

Patrick Rößler

Telepräsenste Bewegung
und haptische Interaktion
in ausgedehnten entfernten
Umgebungen



Patrick Rößler

**Telepräsenze Bewegung und haptische Interaktion
in ausgedehnten entfernten Umgebungen**

Karlsruhe Series on Intelligent Sensor-Actuator-Systems
Volume 3

ISAS | Universität Karlsruhe (TH)
Intelligent Sensor-Actuator-Systems Laboratory

Edited by Prof. Dr.-Ing. Uwe D. Hanebeck

Telepräsente Bewegung und haptische Interaktion in ausgedehnten entfernten Umgebungen

von
Patrick Rößler



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Informatik, 2009

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2009
Print on Demand

ISSN: 1867-3813
ISBN: 978-3-86644-346-4

Telepräsente Bewegung und haptische Interaktion in ausgedehnten entfernten Umgebungen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Patrick Rößler

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Januar 2009

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe D. Hanebeck

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beschreibt die wesentlichen Ergebnisse meiner Forschungstätigkeit am Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme (ISAS) an der Universität Karlsruhe (TH). An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe D. Hanebeck für die hervorragenden Arbeitsbedingungen und die vielen Anregungen zu meiner Forschungstätigkeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn für die Übernahme des Korreferats und das Interesse, das er meiner Arbeit entgegengebracht hat. Stellvertretend für alle Mitglieder und Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs 588 „Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter“, in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, danke ich dessen Sprecher Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann. Herrn Dr.-Ing. Norbert Nitzsche, auf dessen Arbeiten am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik an der Technischen Universität München ich aufbauen konnte, danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern am ISAS für die sowohl menschlich als auch fachlich hervorragende Arbeitsatmosphäre. Insbesondere möchte ich mich bei Frederik Beutler für die langjährige enge Zusammenarbeit und das Trackingsystem, ohne das das Telepräsenzsystem nicht möglich gewesen wäre, und bei Antonia Pérez Arias für die Unterstützung bei der Fertigstellung der haptischen Schnittstelle bedanken.

Auch der Werkstatt des ISAS, vertreten durch Werner Bleier, Hans „Hannes“ Merkle und Wolfgang Rihm, danke ich für ihr Engagement beim Aufbau und bei der Instandhaltung der verschiedenen mechanischen und elektronischen Systeme meiner Arbeit. Mein Dank gilt allen meinen studentischen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern, die durch ihren teilweise unermüdlichen Einsatz und ihre Ideen maßgeblich an der Realisierung des Telepräsenzsystems beteiligt waren. Besonders zu erwähnen sind Timothy Armstrong, Andre Haase, Oliver Hessel, Michael Mende, Stefan Meyer, Sven Möllers und Ferdinand Packi.

Zuletzt danke ich meiner Frau Melanie für die Geduld, die sie mir entgegengebracht hat, und für das unerbittliche Lektorat, das die sprachliche Qualität dieser Arbeit erheblich verbessert hat. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner lieben Tochter Emilia dafür, dass es sie gibt.

Meiner Tochter Emilia

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XVII
Notation	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Grundlagen der menschlichen Wahrnehmungen	4
1.1.1 Wahrnehmung von Bewegung und Lage	4
1.1.2 Navigation	6
1.1.3 Manipulation von Objekten	7
1.2 Immersion und Präsenz	8
1.3 Anforderungen an ein System zur weiträumigen Telepräsenz	9
1.4 Überblick über das Zielsystem dieser Arbeit	10
1.5 Gliederung der Arbeit	13
2 Stand der Forschung	15
2.1 Weiträumige Bewegung	15
2.1.1 Weiträumige Teleoperation	15
2.1.2 Mechanische Bewegungsschnittstellen	16
2.1.3 Algorithmische Lösungen für weiträumige Bewegung	17
2.2 Haptische Schnittstellen	17
2.2.1 Tragbare haptische Schnittstellen	18
2.2.2 Boden- und deckengebundene haptische Schnittstellen	18
2.2.3 Mobile haptische Schnittstellen	19
2.3 Zusammenfassung	20

3	Bewegungskompression zur weiträumigen telepräsenten Bewegung	21
3.1	Überblick über die Bewegungskompression	21
3.1.1	Bewegungskompression als algorithmisches Framework	22
3.2	Statische vs. dynamische Bewegungskompression	23
3.3	Grundlagen der Bewegungskompression	24
3.3.1	Darstellung ebener Pfade	24
3.3.2	Transformation zwischen Benutzer- und Zielumgebung	25
3.4	Zusammenfassung	29
4	Neue Verfahren für die Bewegungskompression	31
4.1	Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen	31
4.1.1	Formulierung als dynamisches Optimierungsproblem	32
4.1.2	Analyse der Randbedingungen	33
4.1.3	Numerische Lösung für die Pfadtransformation	35
4.1.4	Echtzeit-Transformation in nicht-konvexen Umgebungen	40
4.2	Stochastische Zielerkennung und Pfadprädiktion	44
4.2.1	Zielerkennung für bekannte Umgebungen	45
4.2.2	Bayes'scher Schätzer	46
4.2.3	Modellbildung	48
4.2.4	Zielauswahl	50
4.3	Geregelte Benutzerführung	51
4.3.1	Abweichen des Benutzers vom Pfad	51
4.3.2	Benutzermodell bei zielgerichteter Fortbewegung	52
4.3.3	Lösungsansatz	55
4.3.4	Herleitung der Regelparameter	58
4.3.5	Geregelte Benutzerführung bei dynamischer Bewegungskompression	62
4.4	Zusammenfassung	63
5	Weiträumige haptische Interaktion	65
5.1	Semi-mobile haptische Schnittstellen	65
5.2	Trennung von weiträumiger Bewegung und haptischer Darstellung	66

5.3	Regelungskonzept der semi-mobilen haptischen Schnittstelle	67
5.4	Vorpositionierung durch Optimierung der Manipulierbarkeit	68
5.5	Telemanipulation durch Krafrückkopplung	69
5.6	Zusammenfassung	70
6	Prototypischer Aufbau einer semi-mobilen haptischen Schnittstelle	71
6.1	Mechanisches Konzept für eine semi-mobile haptische Schnittstelle	71
6.1.1	Linear-Vorpositioniereinheit	71
6.1.2	Haptischer Manipulator in Parallel-SCARA-Bauart	72
6.2	Kinematik der SMHI	73
6.3	Kraftregelung für den haptischen Manipulator	76
6.4	Optimale Vorpositionierung	78
6.4.1	Optimierung der Manipulierbarkeit	78
6.4.2	Maximierung der Bewegungsfreiheit des Benutzers	79
6.5	Admittanzregelung für die z-Achse	80
6.6	Konzeption einer verteilten Steuerungselektronik für SMHI	81
6.6.1	Elektronikkomponenten	81
6.6.2	Sicherheitskonzept	83
6.7	Zusammenfassung	84
7	Details der Realisierung in Hard- und Software	85
7.1	Modulare Softwarearchitektur	85
7.2	Satelliten-Rechnersystem in der Benutzerumgebung	87
7.3	Realisierung des mobilen Teleoperators	88
7.3.1	Komponenten des mobilen Teleoperators	88
7.3.2	Regelung des Teleoperators	88
7.4	Übertragung von Streaming-Daten	90
7.5	Zusammenfassung	93

8 Experimentelle Evaluierung	95
8.1 Neue Verfahren zur Bewegungskompression	95
8.1.1 Stochastische Zielerkennung und geregelte Benutzerführung	96
8.1.2 Nicht-konvexe Pfadtransformation und geregelte Benutzerführung	99
8.2 Weiträumige haptische Interaktion	102
8.2.1 Darstellung definierter Kräfte	102
8.2.2 Weiträumige Bewegung und haptische Interaktion	104
8.3 Zusammenfassung	107
9 Schlussbemerkungen	109
9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	109
9.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	112
Literaturverzeichnis	115

Abbildungsverzeichnis

1.1	Klassische Teleoperation mit abstrakten Schnittstellen. Der Arbeitsbereich ist stark eingeschränkt, da Benutzer und Teleoperator stationär sind.	2
1.2	Weiträumige Telepräsenz mit simultaner haptischer Interaktion, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird. Durch immersive Schnittstellen und natürliche Fortbewegung taucht der Benutzer in die Zielumgebung ein.	3
1.3	Verdeutlichung der wahrgenommenen Fehlwinkel θ_Z und θ_P und der daraus resultierenden Pfade. (a) Bei der zielgerichteten Fortbewegung. (b) Bei der pfadgerichteten Fortbewegung.	7
1.4	Abstrahierte Darstellung der sensorischen, aktorischen und kognitiven Prozesse bei weiträumiger Bewegung und haptischer Interaktion. Der Kontakt zur Umgebung findet dabei über drei maßgebliche Schnittstellen statt.	10
1.5	Überblick über die Datenströme und beteiligten Komponenten in einem System zur weiträumigen Telepräsenz.	11
3.1	Kompatibilitätsbedingungen für die drei Module der Bewegungskompression. . .	23
3.2	Vergleich des Ablaufs bei statischer und dynamischer Bewegungskompression. . .	24
3.3	Die Benutzerlage ist im krummlinigen Pfadkoordinatensystem \tilde{S} eindeutig durch s , n und θ bestimmt.	27
4.1	Beispiel für eine nicht-konvexe Umgebung X dargestellt durch ihre konvexe Hülle C und die inneren Objekte $I_1 \dots I_3$	33
4.2	$J_N(\underline{c}_U, \lambda)$ für $\alpha = 100$ und verschiedene Werte von λ für eine beispielhafte Umgebung, wobei Werte größer als eins der besseren Übersicht willen abgeschnitten wurden.	38
4.3	Transformation eines 12m langen geraden Pfads in der Umgebung aus Abbildung 4.2. Dargestellt sind der transformierte Pfad (blaue Linie), die Stützstellen (blaue Punkte), Anfangspunkt und -orientierung (rote Linie) und die Begrenzungen der Benutzerumgebung (schwarze Linie).	39

4.4	Größter γ -Bogen bei gleicher Startposition für verschiedene Werte von γ . (a) $\gamma = \pi$, (b) $\gamma = \frac{\pi}{2}$, (c) $\gamma = \frac{\pi}{4}$. Der Radius des Kreisbogens nimmt mit kleiner werdendem γ zu, d. h. die Krümmung nimmt ab.	41
4.5	Alle vom γ -Bogen-Algorithmus gefundenen Links-Bögen für $\gamma = \pi$. Ungültige entfernte Bögen sind mit gestrichelter Linie dargestellt. (a) Bögen berühren eine Außenwand. (b) Bögen berühren eine Innenwand. (c) Bögen führen durch eine Ecke.	42
4.6	Inkrementelle Pfadtransformation in derselben Umgebung und mit den gleichen Startbedingungen wie in Abbildung 4.3. Dabei wurde eine Schrittweite von 0, 1 m und $\gamma = \frac{\pi}{2}$ gewählt.	44
4.7	Struktur des Filters zur Zielerkennung.	47
4.8	Die bei der Zielerkennung verwendeten relativen Merkmale. (a) Abstand zum Ziel. (b) Die relative Blickrichtung entspricht dem wahrgenommenen Fehlwinkel. (c) Relative Bewegungsrichtung.	49
4.9	Das aktuelle Ziel wird in einem zweistufigen Verfahren aus allen zur Verfügung stehenden Zielobjekten ausgewählt.	50
4.10	Abweichen des Benutzers vom Sollpfad bei Standardbenutzerführung. Dargestellt sind Benutzerumgebung a, Benutzerpfad b, Benutzer-/Proxyposition c, Zielpfad d, Zielobjekt e, Zielumgebung f, wahrgenommener Winkelfehler zum Ziel g und die tatsächliche Richtungskorrektur h.	52
4.11	Modell des Benutzerverhaltens bei zielgerichteter Fortbewegung.	53
4.12	Vergleich der vom realen Benutzer (blau) und vom Benutzermodell (rot) zurückgelegten Pfade.	54
4.13	Die Positionstransformation hält den Benutzer auf dem Benutzerpfad, der Proxy weicht allerdings weiterhin vom Zielpfad ab. Dargestellt sind Sollorientierung des Benutzers a, Ziel nach der zusätzlichen Rotation b, der Benutzerpfad c und der Zielpfad d.	56
4.14	Die Blicktransformation lenkt sowohl Benutzer als auch Proxy auf dem Sollpfad. Dargestellt sind Sollorientierung des Benutzers a, wahrgenommene Zielposition b, tatsächliche Zielposition c, Benutzerpfad d und Zielpfad e.	57
4.15	Die Reglerkomponente beeinflusst den vom Benutzer wahrgenommenen Fehlwinkel zum Ziel abhängig vom Abstand zum beabsichtigten Pfad. Die Bewegungskompression wirkt als systematische Störung auf das Pfadfolgeverhalten des Benutzers.	59
4.16	Die bei der Herleitung des Reglers betrachtete Region.	60
4.17	Fehlererhaltende Bestimmung des Planungsbezugspunkts und Pfadprädiktion in der Zielumgebung bei geraden Zielpfaden.	63

5.1	Reglerarchitektur der semi-mobilen haptischen Schnittstelle. Der haptische Manipulator ist kraftgeregelt, die Positionsregelung der Vorpositioniereinheit folgt einer weiteren Optimierung.	67
5.2	Bei der Krafrückkopplung verhält sich die haptische Schnittstelle als Admittanz und der Teleoperator bzw. die virtuelle Zielumgebung als Impedanz. Kraftvektoren und Endeffektorpositionen werden jeweils nur in eine Richtung durch einen Kommunikationskanal zwischen Benutzer- und Zielumgebung übertragen. Dabei werden die Daten gegebenenfalls durch die Bewegungskompression modifiziert. .	69
6.1	Simulation der hier vorgestellten SMHI. Die Vorpositioniereinheit wurde dabei aus den CAD-Daten erstellt, der haptische Manipulator ist gegenüber dem realen System stark vereinfacht und dient nur der Veranschaulichung des Konzepts. . .	72
6.2	Haptischer Manipulator in Parallel-SCARA-Bauweise. Die inneren Schenkel des Parallel-SCARA wurden durch Ringantriebe ersetzt, so dass ein unendlicher rotatorischer Freiheitsgrad zur Verfügung steht. Die abgeknickten äußeren Schenkel vermeiden Kollisionen mit der Basis beim Anfahren extremer Positionen.	73
6.3	Schematische Darstellung der kinematischen Kette der SMHI.	74
6.4	Wahl der für die Regelung der SMHI bedeutenden Koordinatensysteme.	74
6.5	Projektion des Parallel-SCARA-Manipulators zur Herleitung der kinematischen Gleichung.	76
6.6	Die Manipulierbarkeit w des SCARA-Manipulators. An Stellen außerhalb des Arbeitsbereichs wurde für w der Wert 0 angenommen.	78
6.7	Der Abstand d zwischen dem Benutzer und dem Linearsystem ist abhängig vom Winkel ϕ	80
6.8	Admittanzregelung für die nicht-redundant ausgelegte z -Achse.	81
6.9	Die für die Regelung der SMHI entwickelten Elektronikkomponenten. Abgebildet sind der Masterknoten (links), ein Slaveknoten (rechts oben) und zwei verschiedene Adapterplatinen (rechts unten).	82
6.10	Datenlogistische Sicht auf die zur Steuerung der SMHI eingesetzten elektronischen Komponenten.	83
7.1	Datenströme zwischen den Modulen bei einer beispielhaften Konfiguration der Telepräsenzumgebung.	86
7.2	Der Satellitenrechner mit den darin integrierten Hardwarekomponenten.	87
7.3	Der mobile Teleoperator bestehend aus einer omnidirektionalen mobilen Plattform und einem Schwenk-Neige-Kopf.	89
7.4	Auflösung der Redundanz bei der Regelung des mobilen Teleoperators.	89

7.5	Verarbeitungspipeline für die Übertragung von Streaming-Daten.	91
7.6	Das Stereomikrofonsystem am Hals des Teleoperators.	92
8.1	Screenshots aus dem Video zum Telepräsenzexperiment zwischen Karlsruhe und München.	95
8.2	Der Pfad des Proxys durch die Zielumgebung (rot) und die prädizierten Pfade (magenta) vom jeweiligen Planungsbezugspunkt (grün) zum erkannten Zielobjekt.	97
8.3	Abweichung d_{Pfad} vom prädizierten Pfad über die zurückgelegte Weglänge s . . .	98
8.4	Pfad des Benutzers in der Benutzerumgebung.	98
8.5	Aufbau für das Telepräsenzexperiment in realer Zielumgebung. Das Satelliten-Rechnersystem wird vom Benutzer verdeckt.	99
8.6	Sollpfad (grün) und tatsächlicher Pfad (rot) des Teleoperators in der Zielumgebung. Die eingezeichneten Wände dienen nur der Veranschaulichung. Die tatsächliche Teleoperatorposition im Raum lässt sich nicht rekonstruieren, da die Selbstlokalisierung der mobilen Plattform allein auf der Odometrie basiert. . . .	100
8.7	Sollorientierung des Teleoperators (grün), Sollorientierung der Plattform (rot), tatsächliche Orientierung der Plattform (schwarz) und Vorgabe für den Schwenk-Neige-Kopf (blau).	101
8.8	Der aus der nicht-konvexen Pfadtransformation resultierende Sollpfad (grün) in der Benutzerumgebung und der tatsächliche Benutzerpfad (rot).	101
8.9	Der Radiusverlauf der γ -Bögen während des Experiments.	102
8.10	Koordinierte Bewegung von haptischem Manipulator und Vorpositioniereinheit und auftretende Kräfte am Endeffektor bei freier Bewegung entlang einer Achse.	103
8.11	Koordinierte Bewegung von haptischem Manipulator und Vorpositioniereinheit und auftretende Kräfte am Endeffektor bei Bewegung entlang einer Achse mit Wandkontakt.	104
8.12	Experimentalaufbau in der Benutzerumgebung	105
8.13	Kopftrajektorie (blau), Endeffektortrajektorie (grün) und Trajektorie der Linear-einheit (rot) bei der Exploration einer Umgebung mit zwei Hindernissen.	106
8.14	SCARA-Öffnungswinkel $\hat{\psi}$ (rot) und SCARA-Orientierung $\hat{\phi}$ (blau) während des Experiments.	106

Notation

Indizes

$(\cdot)_U$	Benutzer oder Benutzerumgebung (engl. <i>user</i>)
$(\cdot)_T$	Proxy oder Zielumgebung (engl. <i>target</i>)
$(\cdot)_O$	in Weltkoordinaten
$(\cdot)_H$	im lokalen Benutzerkoordinatensystem (meist bezüglich des Kopfs)
$(\cdot)_G$	Zielobjekt bei zielgerichteter Fortbewegung (engl. <i>goal</i>)
$(\cdot)_L$	die lineare Vorpositioniereinheit beschreibende Werte
$(\cdot)_S$	haptischer SCARA-Manipulator
$(\cdot)_E$	Endeffektor der haptischen Schnittstelle
$(\cdot)_P$	Werte der mobilen Plattform des Teleoperators
$(\cdot)_C$	Werte des Schwenk-Neige-Kopfs (von engl. <i>camera</i>)
$(\cdot)_{soll}$	Sollwert bei Reglern
$(\cdot)_k$	zum Zeitpunkt k (bei zeitdiskreten Systemen)

Häufig tragen Werte mehrere Indizes. Diese werden durch Kommata voneinander getrennt. Eine Ausnahme besteht allerdings in der Kombination von Koordinatensystemen und der Spezifikation der jeweiligen betrachteten Umgebung. So steht z. B. $(\cdot)_{OT}$ für die Weltkoordinaten der Zielumgebung. Dort, wo der erläuterte Zusammenhang unabhängig von Benutzer- oder Zielumgebung ist, oder aus dem Zusammenhang eindeutig klar wird um welche der Umgebungen es sich handelt, kann die Bezeichnung der Umgebung weggelassen werden.

Allgemeine Notation

\mathbb{R}	die Menge der reellen Zahlen
\mathbb{N}	die Menge der natürlichen Zahlen
$\hat{(\cdot)}$	tatsächlicher bzw. gemessener Wert
$\dot{(\cdot)}, \ddot{(\cdot)}$	Ableitungen nach der Zeit
$(\cdot)^*$	optimaler Wert
S	orthogonales Koordinatensystem
${}^A\mathbf{T}_B$	Homogene Transformation von Koordinatensystem S_A nach S_B
\mathbf{I}	Einheitstransformation

Bewegungskompression

\tilde{S}	krummliniges Pfadkoordinatensystem
\underline{x}	Benutzerlage als Projektion auf die xy -Ebene
x, y, ϕ	Komponenten von \underline{x}
s	Pfadvariable
$\kappa(s)$	Krümmung entlang eines Pfads
$\psi(s)$	Orientierung entlang eines Pfads
$\underline{c}(s)$	Position entlang eines Pfads
$c_x(s), c_y(s)$	Komponenten von $\underline{c}(s)$
$\underline{\rho}$	Planungsbezugspunkt
ψ	Startorientierung am Planungsbezugspunkt
J	Gütefunktion
$\underline{\eta}$	Parametervektor

Haptische Interaktion

\underline{x}	Positionsvektor im kartesischen Raum
x, y, z	Komponenten von \underline{x}
\underline{F}	Kraftvektor im kartesischen Raum
F_x, F_y, F_z	Komponenten von \underline{F}
$\underline{\gamma}$	Konfiguration des haptischen Manipulators
α, β	Komponenten von $\underline{\gamma}$
$\underline{\tau}$	Gelenkmomentenvektor des haptischen Manipulators
M_α, M_β	Komponenten von $\underline{\tau}$
r	aktiv angetriebenes rotatorisches Gelenk
l	aktiver Linearantrieb
p	passives rotatorisches Gelenk
\mathbf{J}	Jacobi-Matrix der Kinematikgleichung

KAPITEL 1

Einleitung

Unter dem Begriff *Telerobotik* versteht man Robotikanwendungen, bei denen ein Roboter von einem menschlichen Benutzer aus der Ferne bedient wird. Solche Systeme sind aus mehreren Gründen reizvoll. Zum Einen macht die Telerobotik den Einsatz von Robotern in vielen Anwendungen erst möglich, da die überlegenen menschlichen kognitiven Fähigkeiten bei der Handlungsplanung und -ausführung gerade in unstrukturierten Umgebungen unverzichtbar sind. Zum Anderen erhält der Mensch die Möglichkeit, auch an solchen Orten aktiv zu werden, die gesundheitsschädlich, unerreichbar oder einfach weit entfernt sind. Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl von Anwendungsideen für die Telerobotik entwickelt. Unter anderem werden solche Systeme in der Chirurgie [11], der Kranken- und Altenpflege [73], im Katastrophenschutz [1] und sogar in der Raumfahrt [83] eingesetzt. Aber auch im Bereich der Unterhaltung [122] halten sie langsam Einzug¹.

Eine neue Anwendung für solche Systeme wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 588 „Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter“² entwickelt und soll die Einsetzbarkeit von Haushaltsrobotern verbessern. Da Haushaltsroboter typischerweise in unstrukturierten und dynamischen Umgebungen eingesetzt werden und in direktem Kontakt zu Menschen stehen, deren Handlungen häufig nicht eindeutig klassifiziert werden können, kommt es immer wieder zu sogenannten Ausnahmesituationen. Dabei handelt es sich um Situationen, in denen die Planungs- oder Ausführungseinheiten ihre momentane Aufgabe nicht erfolgreich beenden können und deshalb auf menschliche Hilfe angewiesen sind.

Um solche Situationen für den Besitzer des Roboters möglichst transparent zu behandeln, wird in [126] ein Service-Center zur telepräsenten Ausnahmebehandlung entwickelt. Von diesem Service-Center aus kann ein Operator, im Kontext der Telepräsenz als *Benutzer* bezeichnet, eine Vielzahl von Robotern überwachen. Falls einer dieser Roboter in eine Ausnahmesituation gerät, übernimmt der Benutzer die Steuerung des Roboters und löst sie dadurch auf.

Wie erfolgreich das Service-Center eingesetzt werden kann, hängt stark davon ab, welche Schnittstellen zum Robotersystem dem Benutzer zur Verfügung stehen. Um Eingewöhnungszeiten bei wechselnden Einsatzumgebungen und verschiedenen Robotern zu minimieren und

¹ <http://www.visbox.com/cq3a/>

² <http://www.sfb588.uni-karlsruhe.de/>

gleichzeitig den Fokus auf der Aufgabe in der Zielumgebung zu halten, muss dem Benutzer ein intuitiver und möglichst transparenter Zugang zur Teleoperation des Roboters gegeben werden. Ein Telepräsenzsystem mit weiträumiger Bewegung und haptischer Interaktion, wie es in den folgenden Kapiteln vorgestellt wird, ist für ein solches Szenario ideal.

Von der Teleoperation zur Telepräsenz

Bei der Telerobotik kann abhängig vom Immersionsgrad³ des Benutzers zwischen *Teleoperation* und *Telepräsenz* unterschieden werden. Die Übergänge sind jedoch fließend. Der Begriff *Teleoperation* bezieht sich auf das Ausführen (*-operation*) von Handlungen durch einen Roboter in der Ferne (*Tele-*). Die visuelle Wahrnehmung der entfernten Umgebung findet z. B. über einen Bildschirm statt, auf dem das Bild einer in der entfernten Umgebung angebrachten Kamera zu sehen ist. Zur Steuerung des Roboters stehen häufig nur ein oder mehrere Steuerknüppel zur Verfügung. Solch abstrakte Schnittstellen (Abbildung 1.1) binden einen erheblichen Teil der Aufmerksamkeit des Benutzers, der dann bei der Ausführung der eigentlichen Aufgabe fehlt.

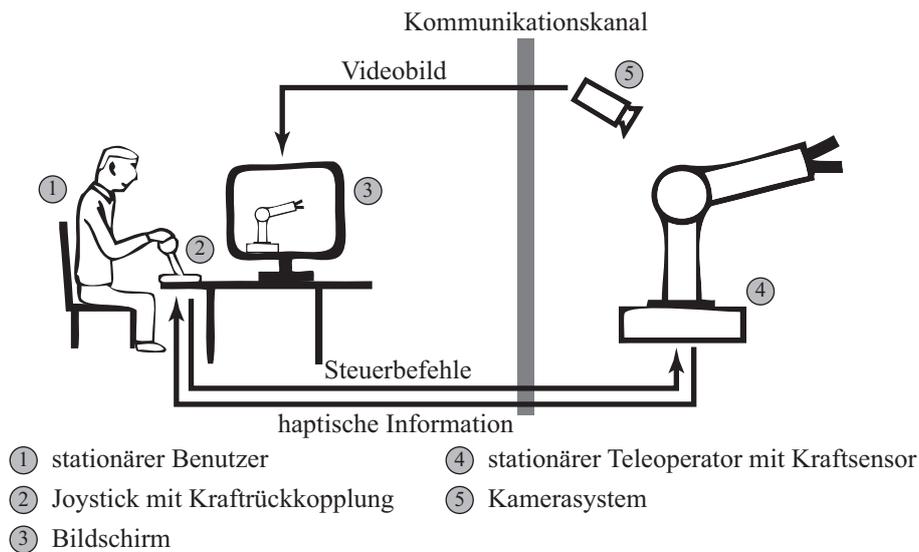


Abbildung 1.1: Klassische Teleoperation mit abstrakten Schnittstellen. Der Arbeitsbereich ist stark eingeschränkt, da Benutzer und Teleoperator stationär sind.

Im Gegensatz dazu zielt der Ausdruck *Telepräsenz* darauf ab, dass es nicht bei einem reinen Ausführen von Handlungen bleibt, sondern dass der menschliche Benutzer mit *allen* seinen sensorischen, aktorischen und kognitiven Fähigkeiten in die entfernte Umgebung eintaucht und sich dort anwesend (*-präsenz*) fühlt. Gelingt dieses Eintauchen in die entfernte Umgebung, kann sich der Benutzer dort voll und ganz seiner Aufgabe widmen, ohne dass er von der Schnittstelle abgelenkt wird.

³ Die Immersion, ein Maß für das Eintauchen in die Zielumgebung, und der eng verwandte Begriff der Präsenz werden in Abschnitt 1.2 genauer betrachtet.

Der Schwerpunkt bei der Telepräsenz muss also darauf liegen, dem Benutzer möglichst wirklichkeitsnahe und intuitive Schnittstellen zur entfernten Umgebung zur Verfügung zu stellen. Dabei sind diese Schnittstellen im Idealfall völlig transparent für den Benutzer. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Schnittstellen wird in der Literatur [3] gelegentlich zwischen Telepräsenz und Teleaktion unterschieden, wobei Telepräsenz den sensorischen und Teleaktion den aktorischen Zugang zur entfernten Umgebung beschreiben soll. Der Autor möchte von dieser Unterscheidung allerdings Abstand nehmen, da, wie in Abschnitt 1.2 erläutert wird, die Möglichkeit zur Interaktion einen wesentlichen Beitrag zum Präsenzeindruck leistet und somit nicht von diesem zu trennen ist.

Eine besondere Herausforderung stellt die *weiträumige Telepräsenz* dar, die erst in den letzten Jahren in das Interesse der Forschungsgemeinschaft getreten ist. Hierbei stellen sich die Fragen, wie eine wirklichkeitsnahe Schnittstelle zu einer unbegrenzten Fortbewegung aussehen kann und wie sich weiträumige Bewegung mit haptischer Interaktion vereinbaren lässt. Diese Fragen werden in den folgenden Kapiteln erörtert.

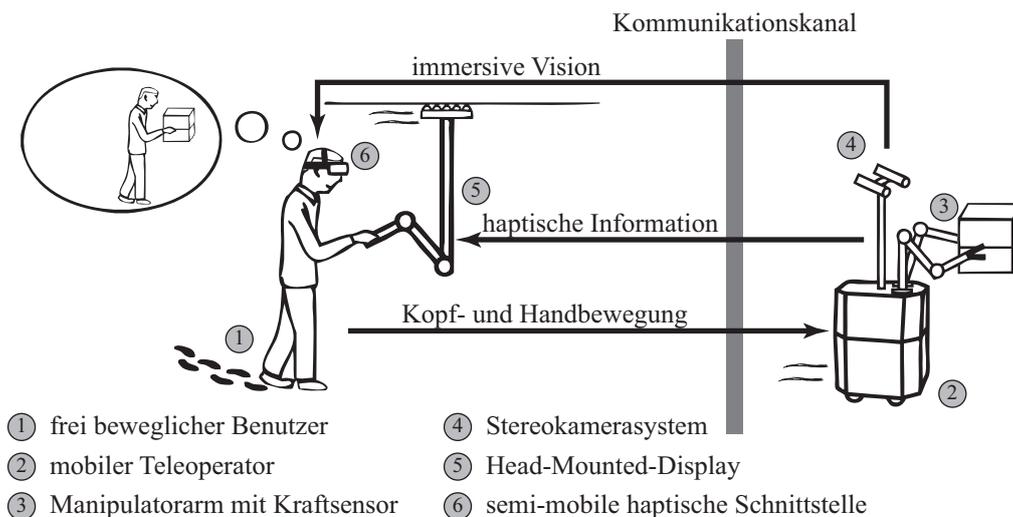


Abbildung 1.2: Weiträumige Telepräsenz mit simultaner haptischer Interaktion, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird. Durch immersive Schnittstellen und natürliche Fortbewegung taucht der Benutzer in die Zielumgebung ein.

Vorgreifend auf die in den Abschnitten 1.1 bis 1.3 erarbeiteten Anforderungen an ein solches System soll hier erwähnt werden, dass das in Abschnitt 1.4 vorgestellte und im Verlauf dieser Arbeit ausgearbeitete Telepräsenzsystem (Abbildung 1.2) dem Benutzer weiträumige Exploration durch natürliches Gehen erlaubt. Dabei nimmt er die entfernte Umgebung über immersive visuelle und auditive Darstellung wahr. Die haptische Interaktion wird über eine speziell für das Problem ausgelegte haptische Schnittstelle vermittelt.

1.1 Grundlagen der menschlichen Wahrnehmungen

Um die Anforderungen an ein System für die weiträumige Telepräsenz bestimmen zu können, müssen zunächst die sensorischen, aktorischen und kognitiven Fähigkeiten, die vom Benutzer eines solchen Systems gefragt sind, beleuchtet werden. Eine produktive Verwendung eines Telepräsenzsystems wird immer zwei Fähigkeiten voraussetzen: Die Fähigkeit zur Navigation und die Fähigkeit zur Manipulation von Objekten.

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen dieser Fähigkeiten dargelegt. Die Darstellung der Funktionsweise der einzelnen Sinne und der damit verbundenen kognitiven Leistungen folgt, wo nicht anderweitig angegeben, den Ausführungen in [35].

1.1.1 Wahrnehmung von Bewegung und Lage

Gesunde sehende Menschen stützen sich bei der Wahrnehmung von Lage und Bewegung sehr stark auf ihren *Gesichtssinn*. Dies liegt daran, dass er als wichtigster Sinn des Menschen reichhaltige Informationen über die Umwelt gibt, die weit über die reine Bestimmung von Bewegung hinaus gehen. Alle diese Funktionen – von der einfachen Detektion von Bewegung bis hin zur Interpretation komplexer Szenen – basieren dabei darauf, dass das von den Objekten in der Umwelt reflektierte Licht auf der Netzhaut von den Fotorezeptoren, lichtempfindlichen Zellen, aufgenommen und in elektrische Pulse umgewandelt wird. Im menschlichen Auge befinden sich zwei Typen von lichtempfindlichen Zellen, die nach ihrer Form benannten Zapfen und Stäbchen. Erstere kommen bei Tageslicht zum Einsatz und ermöglichen das Farbsehen, letztere ermöglichen dem Menschen das Sehen auch bei schlechten Lichtverhältnissen. Durch Zusammenschalten der Fotorezeptoren in perzeptiven Feldern und durch laterale Inhibition werden die Lichtempfindlichkeit erhöht und die Wahrnehmung von Kanten geschärft. Die so vorverarbeiteten elektrischen Signale werden über die Sehnerven an das Sehzentrum im Gehirn weitergeleitet, wo sie zu der wahrgenommenen Szene interpretiert werden.

Für die Wahrnehmung von Lage und Bewegung bietet der Gesichtssinn mehrere Möglichkeiten. Zum einen bietet er als einziger Sinn die Möglichkeit einer absoluten Lagebestimmung. Hierzu dienen in der Umwelt wahrgenommene Objekte als Landmarken. Die Eigenbewegung relativ zur Umwelt kann über den optischen Fluss bestimmt werden. Dabei wird aus der relativen Bewegung von Objektbildern auf der Netzhaut auf die Geschwindigkeit und Richtung der Eigenbewegung geschlossen. Die Wahrnehmungsschwelle für den optischen Fluss steigt dabei von der Fovea in der Mitte des Auges bis zur Peripherie von ca. $0,015^\circ/s$ auf $0,175^\circ/s$ [70], was hauptsächlich an der deutlich geringeren Dichte von Fotorezeptoren im Bereich der Peripherie liegt. Eine zweite Möglichkeit zur Bestimmung von Bewegung ist durch Auswertung der benötigten willkürlichen Augen- und Kopfbewegungen gegeben, die benötigt werden, um das Bild eines Objekts auf der Netzhaut stabil zu halten [37]. Nach der derzeit vorherrschenden Efferenztheorie

werden die Augenbewegungen hierfür aus sogenannten Efferenzkopien der motorischen Steuersignale abgeleitet. Die Kopfbewegungen dagegen scheinen aus dem Vestibularsinn [57] abgeleitet zu werden, was die starke Verknüpfung der verschiedenen Sinne zeigt.

Der zweite Sinn mit großer Bedeutung für die Bestimmung von Lage und Bewegung ist der *Vestibularsinn*. Wie alle Säugetiere besitzt der Mensch zwei Vestibularorgane, die sich im Innenohr befinden. Die Bewegungswahrnehmung beruht dabei auf der Messung der Relativbewegung zwischen der in den Organen befindlichen Flüssigkeit, der Endolymphe, und dem umgebenden Gewebe. Durch diese Relativbewegung werden die Zilien, feine Härchen, angeregt, wodurch in den zugehörigen Haarzellen elektrische Impulse entstehen, die durch die anliegenden Nervenfasern an das Gehirn weitergeleitet werden.

Das Vestibularorgan besteht aus zwei Teilen, dem Bogengangorgan und dem Statolithenorgan. Das Bogengangorgan spricht auf Rotationsbeschleunigungen in den drei Hauptrichtungen an. Bei einer rotatorischen Bewegung bewegt sich die Endolymphe wegen ihrer Trägheit zunächst nicht, wodurch an der Cupula, einem Wulst auf dem die Zilien sitzen, eine Auslenkung wahrgenommen wird. Da durch das Bogensystem eine Art mechanischer Integration stattfindet, wird die Wahrnehmung des Bogengangorgans allerdings von der Rotationsgeschwindigkeit und nicht von der Rotationsbeschleunigung dominiert. Bei langanhaltender gleichförmiger Bewegung wird auch die Endolymphe beschleunigt, so dass der Reiz langsam abklingt und eine Gewöhnung an die Bewegung stattfindet. Das Statolithenorgan misst hingegen direkt die translatorischen Bewegungen, die aus den bei einer Linearbeschleunigung resultierenden Kräften entstehen. Beide Vestibularorgane messen also nur relative Änderungen der Lage, eine absolute Lagebestimmung ist nur mittels Integration zu erreichen. Allerdings mit einer Ausnahme: Die Lage des Kopfs kann immer mit der Richtung der Schwerkraft, die über die Erdbeschleunigung im Statolithenorgan wahrgenommen wird, in Beziehung gesetzt werden. Die Wahrnehmungsgrenze für rotatorische Bewegungen liegt ohne festen Bezug, also bei Rotationen in der horizontalen Ebene, zwischen $1,3^\circ/\text{s}$ und $2,4^\circ/\text{s}$ [74]. Bei Rotationen mit festem Bezug ist sie deutlich niedriger.

Eine ganze Gruppe von Sinnen sind die *somatosensorischen Sinnessysteme*, die die Hautsinne und den Stellungssinn beinhalten. Für die Lage- und Bewegungswahrnehmung ist dabei vor allem der Stellungssinn, auch kinästhetisches oder propriozeptives System genannt, interessant. Über Rezeptoren an den Muskelspindeln, Gelenken und Sehnen wird die Stellung der Gelenke und die an ihnen auftretenden Kräfte bestimmt. Auch hier werden Efferenzkopien der Steuersignale für die motorischen Bewegungen in die Wahrnehmung integriert. Unter den Hautsinnen ist nur ein kleiner Teil der haptischen Wahrnehmung, nämlich die Drucksensorik an den Füßen, für die Bestimmung von Lage und Bewegung von Bedeutung. Durch die starke Vernetzung mit den anderen Sinnen und ihre Heterogenität ist der Einfluss der somatosensorischen Sinne für die Wahrnehmung der Eigenbewegung noch nicht restlos geklärt.

Für den Rest dieser Arbeit soll unter dem Begriff *Propriozeption* bzw. *Selbstwahrnehmung* der Teil der somatosensorischen und vestibularen Wahrnehmung zusammengefasst sein, der der Feststellung der Eigenbewegung dient, ohne dabei auf ein festes Bezugssystem zuzugreifen. Durch diese Abstraktion soll verdeutlicht werden, dass in dieser Arbeit vor allem von Interesse

ist, ob die Wahrnehmung der Lage absolut in der Umwelt oder aus der Integration relativer Bewegungsinformation entsteht.

1.1.2 Navigation

Nach [26] gehören zur menschlichen Navigationsfähigkeit kognitive Fähigkeiten auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen, die in drei Gruppen *kognitive Kartierung*, *Entscheidungsfindung* und *Ausführung von Entscheidungen* eingeteilt werden. Der im Folgenden verwendete Navigationsbegriff beschränkt sich allerdings auf den Teil der Navigation, der in direkter Wechselwirkung mit der Umgebung des Menschen steht, der Ausführung. Hierbei sind vor allem drei in [59] definierte Teilaufgaben von Interesse. *Fortbewegung* und *Lenkung* (im Folgenden kurz als Fortbewegung bezeichnet) beschreiben die tatsächliche Handlung der schrittweisen Vorwärtsbewegung und der damit verbundenen Orientierungsänderung. Die Bewegung auf einem zuvor festgelegten Pfad⁴ wird als *Pfadverfolgung* bezeichnet.

Für diese Arbeit ist dabei vor allem von Interesse, welche kognitiven Aufgaben mit der Pfadverfolgung verbunden sind, und wie sich diese auf die Ausführung der Fortbewegung auswirken. Eine Vielzahl von Studien [4, 5, 25, 41, 103] hat sich mit der Frage beschäftigt, welche der in Abschnitt 1.1.1 beschriebenen Sinne zur Navigationsfähigkeit beitragen und wie groß ihr Anteil ist. Dabei ist unbestritten, dass sich der Mensch sehr stark auf seinen Gesichtssinn stützt, obwohl auch durch reine Pfadintegration, d. h. Navigation nur basierend auf relativen Bewegungsmessungen, erstaunlich gute Ergebnisse erzielt werden können [7, 72]. Die visuelle Navigation basiert natürlich stets auf einer Mischung der verschiedenen Modi zur visuellen Lage- und Bewegungsschätzung. Dabei scheint aber die Lokalisierung an Landmarken, und hier vor allem am Endpunkt der geplanten Bewegung, den größten Einfluss zu haben [29, 91]. Insgesamt wird die Navigation also hauptsächlich von der Orientierung an Landmarken und dem Einfluss der propriozeptiven Sinne bestimmt [89].

Modellierung der zielgerichteten Fortbewegung

Ein konkretes Modell für die Fortbewegung ist in der Literatur allerdings nur sehr schwer zu finden. Einigkeit scheint darüber zu herrschen, dass es für den Menschen hauptsächlich zwei Eingangsgrößen bei der Pfadverfolgung gibt, den wahrgenommenen Winkel θ zu einem Orientierungspunkt und den Abstand zum Zielpunkt des Pfads d . Dieses Modell scheint sogar davon unabhängig zu sein, ob die relative Lage zu Orientierungs- und Zielpunkt tatsächlich visuell bestimmt wird, oder ob sie aus der Pfadintegration resultiert [72]. Nach [129] lässt sich dabei das Richtungsänderungsverhalten des Menschen als Proportionalregler⁵ $\dot{\phi} = k \cdot \theta$ darstellen, wobei $\dot{\phi}$ die Rotationsgeschwindigkeit um die Körpersenkrechte beschreibt, also die

⁴ Hierbei wird allerdings keine Aussage darüber getroffen, ob und in welcher Qualität dieser Pfad tatsächlich reproduziert wird.

⁵ Dieses Modell wird in Abschnitt 4.3.2 noch einmal ausführlich dargestellt und verfeinert.

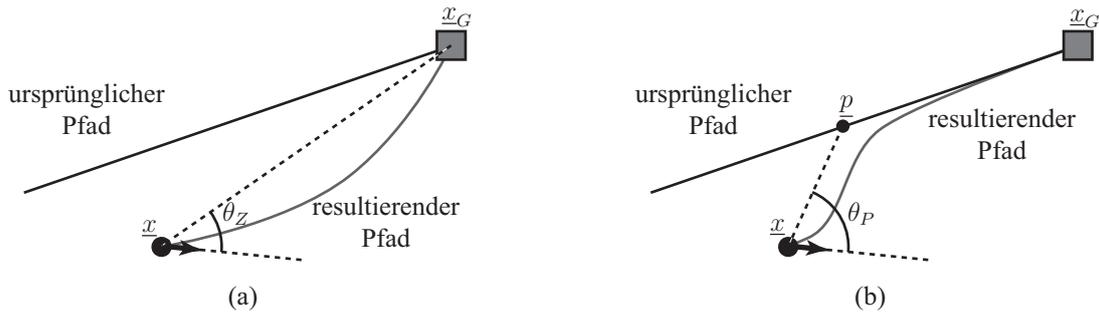


Abbildung 1.3: Veranschaulichung der wahrgenommenen Fehlwinkel θ_Z und θ_P und der daraus resultierenden Pfade. (a) Bei der zielgerichteten Fortbewegung. (b) Bei der pfadgerichteten Fortbewegung.

Richtungsänderung. Die Reglerkonstante k ist zwar benutzerabhängig, ein Wert von $k = 4,5 \frac{1}{s}$ wird aber durch Experimente nahegelegt.

Bei zielgerichteter Fortbewegung ist der Orientierungspunkt für die Richtungsänderung stets der Zielpunkt \underline{x}_G des Pfades. Das heißt, dass der Winkel $\theta_Z = \text{atan2}(\underline{x}_G - \underline{x}) - \phi$ der Winkeldifferenz zwischen der Orientierung ϕ des Menschen und der Orientierung auf den Zielpunkt entspricht. θ_Z ist also der wahrgenommene Winkel zum Zielobjekt.

In [76] wird noch ein zweites Fortbewegungsmodell vorgeschlagen. Hierbei orientiert sich der Mensch an seinem ursprünglich beabsichtigten Pfad und versucht diesen wieder zu erreichen, wenn er einmal davon abgewichen ist. Für dieses Modell wird als Orientierungspunkt \underline{p} willkürlich ein Punkt auf dem Pfad gewählt, der z. B. eine Schrittlänge vor dem Menschen liegt. Bei dieser pfadgerichteten Fortbewegung gilt dann, dass $\theta_P = \text{atan2}(\underline{p} - \underline{x}) - \phi$. Ein solches pfadgerichtetes Verhalten ist allerdings nur dann realistisch, wenn der Pfad für den Menschen, z. B. durch eine Markierung oder durch begrenzende Hindernisse, gut zu erkennen ist und stellt somit einen Spezialfall dar. In Abschnitt 4.3 wird sich zeigen, dass dieses Verhalten quasi als Idealfall gilt.

1.1.3 Manipulation von Objekten

Auch bei der Manipulation von Objekten ist der Gesichtssinn maßgeblich beteiligt. Allerdings kommen hier höhere kognitive Fähigkeiten [34] zum Einsatz als bei der Bestimmung von Eigenbewegungen. Zur Manipulation von Objekten ist es unvermeidlich, dass aus den visuellen Informationen auf die Objekteigenschaften zurückgeschlossen wird. Dies ist natürlich nur mit Hilfe des erlernten Wissens über die Umwelt möglich. Dieses Wissen wird auch bei der Bestimmung von solch grundsätzlichen Maßen wie der Greifdistanz benötigt. Diese kann durch das Wissen über die Größe bestimmter Objekte und den Vergleich mit der eigenen Hand bestimmt werden [34].

Auch die somatosensorische Wahrnehmung kommt bei der Manipulation zum Einsatz. Die propriozeptive Wahrnehmung der Kräfte an den Gelenken, vor allem von Hand und Arm,

und die haptische Wahrnehmung aus der Drucksensorik an den Fingerspitzen stehen dabei in Wechselwirkung mit der efferenten Wahrnehmung der aktiven Eigenbewegung. Allerdings überwiegt auch hier der Einfluss der visuellen Sensorik [15, 22], so dass in Telepräsenz- oder virtueller Realität Objekte sogar ganz ohne somatosensorische Wahrnehmung⁶ erfolgreich manipuliert werden können.

Um Verwirrungen mit der Literatur aus den Bereichen Teleoperation und haptische Interaktion zu vermeiden, werden im Folgenden die in diesen Gebieten üblichen Bezeichnungen verwendet, auch wenn sie den oben eingeführten Begriffen teilweise widersprechen. Mit *Haptik* wird im Rest der Arbeit die Wahrnehmung der bei der Manipulation entstehenden Kräfte und Momente in Hand und Arm bezeichnet. Davon hebt sich die *taktile* Wahrnehmung ab, die die Drucksensorik an den Fingerspitzen und der Handfläche beschreibt.

1.2 Immersion und Präsenz

Zwei Begriffe, die vor allem in Verbindung mit virtueller Realität immer wieder genannt werden, aber auch in Bezug auf Telepräsenz von Interesse sind, sind *Immersion* und *Präsenz*. Die Immersion bezeichnet dabei das Eintauchen in eine künstliche, oder auch eine entfernte reale, Umgebung [71]. Die Faktoren die zu Immersion führen sind dabei nach [94] objektiv messbar. Dazu gehören z. B. die Qualität der Darstellung und die Konsistenz der mit den verschiedenen Sinnen wahrgenommenen Eindrücke aus dieser Umgebung, wie sie schon in [101] beschrieben wurden. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Immersion ist die Wahrnehmung der Benutzerschnittstelle als solche. Je weniger sie als künstlich wahrgenommen wird, desto direkter erscheint der Eindruck der dargestellten Umgebung, wodurch der Immersionsgrad steigt. Nicht zuletzt ist auch die Möglichkeit zur Interaktion mit der dargestellten Umgebung von großer Bedeutung für die Immersion.

Präsenz ist hingegen ein psychologisches Konzept, das sich schwerer objektiv beurteilen lässt. Sie wird hauptsächlich durch subjektive Faktoren [94] bestimmt. Der wichtigste hiervon ist die räumliche Präsenz, also der Eindruck an einem Ort zu sein. Hinzu kommt, wie realitätsnah das Wahrgenommene empfunden wird und inwieweit sich die betreffende Person an der Szene beteiligt fühlt. Diese drei Faktoren sind dabei eng mit dem Immersionsgrad korreliert. So wird in [97] gezeigt, dass die räumliche Präsenz steigt, wenn zu visueller Wahrnehmung konsistente propriozeptive Eindrücke hinzukommen. Vereinfacht und hauptsächlich auf die räumliche Präsenz bezogen wird Präsenz „[...] definiert als das Gefühl in einer Umgebung zu sein“⁷ [99].

Eine Spezialisierung des allgemeinen Präsenzbegriffs ist die *Telepräsenz*. „Telepräsenz ist definiert als das Gefühl von Präsenz in einer Umgebung vermittelt durch ein Kommunikationsmedium“⁸ [99]. Das bedeutet insbesondere, dass sich die Anforderungen an Telepräsenz nicht

6 Die efferente Wahrnehmung der aktiven Motorik ist natürlich immer vorhanden, da in solchen Systemen aktive Bewegungen als Eingabe dienen.

7 „[...] defined as the sense of being in an environment.“

8 „Telepresence is defined as the experience of presence in an environment by means of a communication medium.“

von denen der allgemeinen Präsenz unterscheiden. Möchte man den Eindruck der Telepräsenz herstellen, ist die Hauptaufgabe bei dem Entwurf eines Telepräsenzsystems also, möglichst viele Sinneseindrücke aus einer entfernten Umgebung dem Benutzer so realistisch und konsistent wie möglich darzustellen.

1.3 Anforderungen an ein System zur weiträumigen Telepräsenz

Zusammenfassend lassen sich die Ausführungen in Abschnitt 1.1 in abstrahierter Form wie in Abbildung 1.4 darstellen. Dabei kann die Interaktion mit der Umgebung auf drei maßgebliche Schnittstellen reduziert werden: Bei der haptischen Interaktion findet der Kontakt mit der Umgebung über eine haptische Schnittstelle statt, bei der weiträumigen Bewegung interagiert der Benutzer mit der Bewegungsschnittstelle, und die audio-visuelle Schnittstelle liefert zusätzliche visuelle und auditive Informationen über die Umgebung.⁹

Um einem Benutzer Fortbewegung und Manipulation in einer entfernten Umgebung zu ermöglichen und ihm dabei den Eindruck der Präsenz zu vermitteln, muss die Interaktion mit der entfernten Umgebung über möglichst natürliche Implementierungen der oben genannten Schnittstellen erfolgen.

Unverzichtbar ist nach den obigen Ausführungen natürlich der Gesichtssinn, da sich ein Großteil der menschlichen Wahrnehmung auf ihn stützt. Ebenso wird die propriozeptive Wahrnehmung der Bewegung und die haptische Rückkopplung bei Manipulationsaufgaben [47] benötigt. An dieser Stelle kommt auch die Bedeutung des Gehörs zum Tragen. Dieses wurde bisher noch nicht betrachtet, da es für die Lokalisierung kaum von Bedeutung ist. Da der Mensch Geräuschquellen aber mit großer Genauigkeit orten kann [62], fallen Diskrepanzen zwischen visuellen und auditiven Eindrücken auf und können so den Präsenzeindruck schmälern. Auf Überlegungen zur Übertragung und Darstellung von Geruch und Geschmack soll in dieser Arbeit verzichtet werden, da diese Sinne von den anderen betrachteten Sinnen weitestgehend unabhängig sind und, wenn überhaupt, zu Fortbewegung und Manipulation nur einen geringen Bezug haben.

Der Vorteil eines weiträumigen Telepräsenzsystems, das dem Benutzer visuelle, auditive, propriozeptive und haptische Eindrücke aus der entfernten Umgebung vermittelt, gegenüber herkömmlicher Teleoperation besteht in erster Linie darin, dass sich der Benutzer ganz auf die ihm gestellte Aufgabe konzentrieren kann. Die Steuerung des Teleoperators oder Avatars erfolgt also intuitiv und „von innen heraus“. Im Idealfall identifiziert sich der Benutzer mit dem Proxy und vergisst dessen Existenz.

Durch die konsistente visuelle und propriozeptive Rückmeldung nutzt er seine menschliche Navigationsfähigkeit auch in der Zielumgebung voll aus [18, 26, 56]. Außerdem verringert sich das Risiko, an der sogenannten Simulatorkrankheit [66] zu leiden, einer Form der Übelkeit, die

⁹ Der Begriff *Schnittstelle* sei hier zunächst als ein allgemeines Konzept verstanden. Die Namensgleichheit mit den später entwickelten technischen Realisierungen für die weiträumige Telepräsenz ist beabsichtigt und soll deren Rolle verdeutlichen.

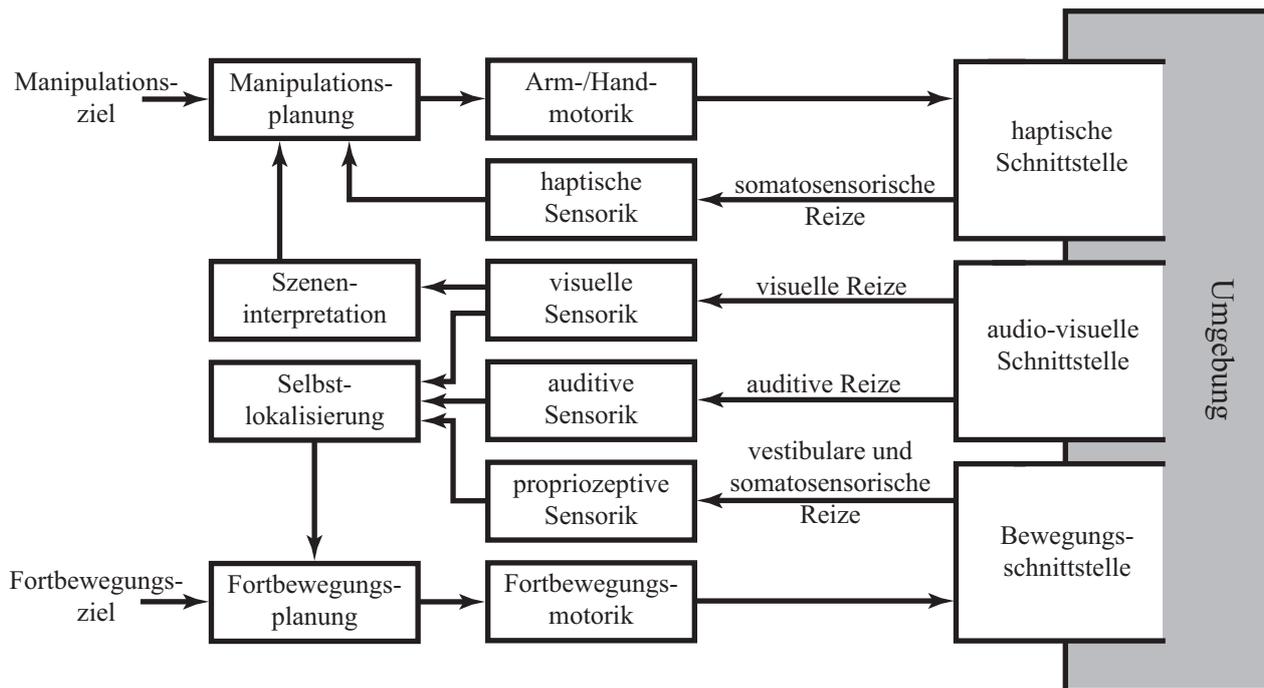


Abbildung 1.4: Abstrahierte Darstellung der sensorischen, aktorischen und kognitiven Prozesse bei weiträumiger Bewegung und haptischer Interaktion. Der Kontakt zur Umgebung findet dabei über drei maßgebliche Schnittstellen statt.

auf starke Inkonsistenzen zwischen visueller und propriozeptiver Information zurückzuführen ist. Kleine Inkonsistenzen hingegen gleicht der Mensch sowohl bei der Erkennung von Lage und Bewegung [42] als auch bei der Manipulation [15] durch sein System der kausalen Wissensrepräsentation meist zu Gunsten der visuellen Eindrücke aus [69].

Während Realisierungen der audio-visuellen Schnittstelle, die die Übertragung und immersive Darstellung von Video- und Audiodaten, z. B. auf Head-Mounted-Displays, ermöglichen, heute schon fast alltäglich sind, liegt die eigentliche Herausforderung in der Konzeption von Bewegungsschnittstellen mit natürlicher Darstellung von Propriozeption und intuitiver weiträumiger Bewegung. Gerade die Darstellung von weiträumiger Bewegung mit simultaner haptischer Interaktion ist dabei noch unzureichend gelöst (siehe Kapitel 2), da hierfür spezielle haptische Schnittstellen entwickelt werden müssen.

1.4 Überblick über das Zielsystem dieser Arbeit

Das Zielsystem dieser Arbeit ist also ein Telepräsenzsystem, das es einem Menschen ermöglicht, auf möglichst intuitive Art und Weise eine entfernte Umgebung zu erkunden und dort Manipulationsaufgaben auszuführen. Hierfür müssen Realisierungen für die drei Schnittstellen zur Umgebung gefunden werden, die im Idealfall für den Benutzer völlig transparent sind, so dass er sich tatsächlich vor Ort fühlt. An dieser Stelle soll zunächst ein Überblick (Abbildung 1.5)

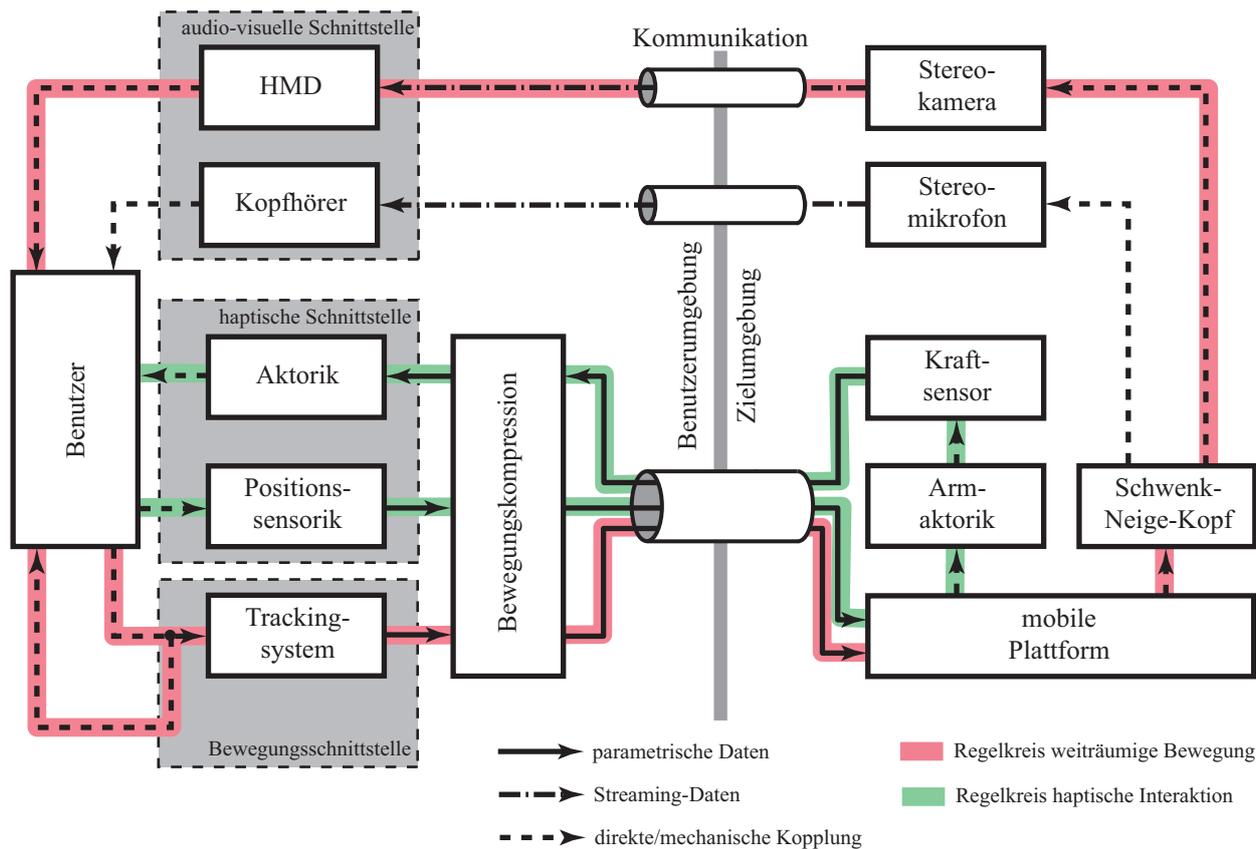


Abbildung 1.5: Überblick über die Datenströme und beteiligten Komponenten in einem System zur weiträumigen Telepräsenz.

über die dazu notwendigen Komponenten und deren Zusammenspiel gegeben werden. Dabei werden häufig verwendete Begriffe definiert.

Bei Telepräsenzsystemen existieren üblicherweise zwei räumlich voneinander getrennte Umgebungen. Der menschliche *Benutzer* befindet sich in der *Benutzerumgebung*, während er in der *entfernten Zielumgebung* von einem *mobilen Teleoperator* vertreten wird. Bei einem solchen Teleoperator handelt es sich um eine mobile Roboterplattform, die mit einem *Manipulatorarm* und einem *Stereokamerasystem* ausgestattet ist. Der Manipulatorarm mit Greifeinheit ist dabei so gestaltet, dass der Teleoperator die Handbewegungen des Benutzers bei Manipulationsaufgaben replizieren kann¹⁰. Das Stereokamerasystem ist so auf einer *Schwenk-Neige-Einheit* angebracht, dass die Kopfbewegungen des Benutzers nachempfunden werden können. Beide Umgebungen sind über einen meist schmalbandigen *Kommunikationskanal*, typischerweise das Internet, miteinander verbunden. Über diesen Kommunikationskanal werden sowohl *parametrische Daten*, wie z. B. Positionsinformationen, als auch *Streaming-Daten*, z. B. Video- oder Audioströme übertragen. Im Folgenden wird angenommen, dass die *Latenz* des Kommunikationskanals zu vernachlässigen ist. Da diese bei latenzbehafteten Systemen üblicherweise den größten Anteil an der Gesamtlatenz hat, spricht man in diesem Fall auch von *latenzfreien*

¹⁰ Der in dieser Arbeit verwendete mobile Teleoperator besitzt noch keinen Manipulatorarm, so dass haptische Interaktion bisher nur in virtuellen Umgebungen möglich ist.

Systemen. Für die Realisierung eines solchen Systems hat diese Annahme die Konsequenz, dass bei jeder Komponente darauf zu achten ist, dass sie einen möglichst geringen Beitrag zur Gesamtlatenz liefert, um die Grundannahme nicht zu verletzen.

In einem Telepräsenzsystem mit haptischer Rückkopplung müssen, wie in Abbildung 1.5 dargestellt, zwei Regelkreise über den Benutzer geschlossen werden: Der Regelkreis für haptische Interaktion ist grün unterlegt, der Regelkreis für die weiträumige Bewegung rot.

Um eine weiträumige Bewegung des Benutzers zu ermöglichen, werden zunächst die Kopfbewegungen des Benutzers von einem *Trackingsystem* erfasst. In der vorliegenden Arbeit wird ein System verwendet, das die Lage des Kopfs in der Benutzerumgebung mit Hilfe akustischer Signale bestimmt. Die so erfassten Daten werden über den Kommunikationskanal an den mobilen Teleoperator übertragen, wo Plattform und Schwenk-Neige-Einheit so angesteuert werden, dass die Bewegung des Benutzers möglichst exakt repliziert wird. Das Stereokamerasystem auf dem Schwenk-Neige-Kopf nimmt Bilder der Umgebung aus Sicht des Teleoperators auf und überträgt diese wieder in die Benutzerumgebung, wo sie dem Benutzer auf einem *Head-Mounted-Display*, also einem am Kopf getragenen Stereo-Bildschirm, dargestellt werden. Diese visuelle Wahrnehmung wird durch die Propriozeption, die aus dem direkten Kontakt mit dem Boden der Benutzerumgebung und der vestibularen Wahrnehmung der Bewegung resultiert, ergänzt. Durch diese sehr realistische Rückkopplung werden wiederum die Bewegungen des Benutzers beeinflusst, so dass sich der Regelkreis schließt.

Zur Realisierung der haptischen Interaktion (grüner Regelkreis) wird in der Benutzerumgebung eine *haptische Schnittstelle*, also ein Gerät zur Darstellung von Kräften, benötigt. Dabei handelt es sich üblicherweise um ein Robotersystem, das fest mit der Hand oder dem Handgelenk des Benutzers verbunden ist und so die Möglichkeit hat, durch gezielte Ansteuerung seiner Aktoren die in der Zielumgebung auf den Manipulatorarm des Teleoperators wirkenden Kräfte dem Benutzer darzustellen. Neben dieser aktorischen Aufgabe kommt ihr noch eine sensorische Aufgabe zu: Sie erfasst die Armbewegungen des Benutzers, die dann in die Zielumgebung übertragen und durch den Teleoperator dargestellt werden. Auch hier wird der Regelkreis über den Benutzer geschlossen, da er mit seinen Bewegungen immer auch auf die erfahrenen Kräfte reagiert.

Die Haupteinschränkung des oben beschriebenen Systems liegt allerdings in der Begrenzung des Aktionsradius. Typischerweise ist die Benutzerumgebung durch räumliche Gegebenheiten, die Reichweite des Trackingsystems oder den Arbeitsraum der haptischen Schnittstelle eng begrenzt, während die Zielumgebung von beliebiger Größe und Form sein kann. Ohne eine zusätzliche Verarbeitung der Bewegungsdaten kann nur ein Teil der Zielumgebung mit der der Benutzerumgebung entsprechenden Form und Größe erkundet werden. Der Einsatz der *Bewegungskompression*¹¹ macht eine Exploration weitaus größerer Zielumgebungen möglich. Hierzu wird eine lineare zeit- und ortsvariante Transformation zwischen den beiden Umgebungen etabliert, d. h. alle Positionsdaten von Kopf und Hand müssen vor der Übertragung in die Zielumgebung entsprechend transformiert werden. Bei den Daten, die aus der Zielumgebung

¹¹ Eine Alternative hierzu stellen die mechanischen Bewegungsschnittstellen dar.

in die Benutzerumgebung übertragen werden, müssen nur solche Daten, die dem Benutzer in weltfesten Koordinaten dargestellt werden, mit der inversen Transformation belegt werden. Für haptische Eindrücke bedeutet das, dass die Kraftvektoren in die Benutzerumgebung transformiert werden müssen, da eine haptische Schnittstelle¹² immer in der Benutzerumgebung verankert ist. Audio- und Videodaten hingegen sind von der Transformation ausgenommen, sofern sie im benutzereigenen Koordinatensystem z. B. über Kopfhörer und Head-Mounted-Display dargestellt werden.¹³

Sollte für eine spezielle Anwendung keine Bewegungskompression erwünscht sein, wird als Transformation stets die Einheitstransformation angenommen. Hierdurch wird die Bewegungskompression umgangen, ohne dass der Datenfluss in Abbildung 1.5 geändert wird.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Telepräsenzsystem lässt sich ebenso zur Exploration *virtueller Zielumgebungen* verwenden. In diesem Fall bezeichnet man den Stellvertreter des Benutzers in der Zielumgebung auch als *Avatar*. Bei der Realisierung von virtuellen Zielumgebungen kann auf aktorische Komponenten, und in den meisten Fällen auch auf deren detailgetreue Simulation, verzichtet werden. Stattdessen werden Kopfbewegungen direkt auf die virtuelle Kamera umgesetzt, die die Basis für die Generierung virtueller Ansichten der Zielumgebung, das *Rendering*, bildet. Ebenso lassen sich die am Endeffektor entstehenden Kräfte anhand der vorgegebenen Bewegungen meist mit stark vereinfachenden Modellen simulieren. Für solche Zielumgebungen, auch ohne die Verbindung mit weiträumiger Telepräsenz, wird häufig der Begriff *virtuelle Realität* gebraucht.

Da die Unterscheidung zwischen realer und virtueller Zielumgebung nur geringe Auswirkungen auf die Benutzerumgebung hat, wird im Folgenden verallgemeinernd von der *Zielumgebung* gesprochen. Teleoperator und Avatar werden synonym gebraucht, zumeist aber unter dem Begriff *Proxy*¹⁴ zusammengefasst.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch nicht auf der Zielumgebung. Stattdessen liegt der Schwerpunkt auf der Benutzerumgebung und dort vor allem auf der direkten haptischen Interaktion mit dem Benutzer und der Möglichkeit zur weiträumigen Bewegung.

1.5 Gliederung der Arbeit

Nach der in diesem Kapitel gegebenen ausführlichen Einführung in die Grundlagen und Herausforderungen der weiträumigen Telepräsenz folgt in Kapitel 2 ein Forschungsüberblick zu den Themenkomplexen weiträumige Bewegung und weiträumige haptische Interaktion.

Die folgenden zwei Kapitel beschäftigen sich mit dem Verfahren der Bewegungskompression. Kapitel 3 erläutert die grundlegende Funktionsweise dieses algorithmischen Frameworks, das

¹² Eine Ausnahme sind die tragbaren haptischen Schnittstellen, da sie am Körper getragen werden und die Kräfte somit in benutzereigenen Koordinaten darstellen.

¹³ Bei Verwendung einer *CAVE* [23] müssen allerdings auch die Videodaten modifiziert werden, da hier die Darstellung auf weltfesten Projektionsflächen erfolgt.

¹⁴ englisch für Stellvertreter

weiträumige Exploration beliebiger Zielumgebungen aus einer beschränkten Benutzerumgebung erlaubt. Dabei erfolgt die Fortbewegung durch natürliches Gehen.

Diese Erläuterungen dienen als Grundlage für Kapitel 4, in dem neue Verfahren für die drei funktionalen Komponenten der Bewegungskompression vorgestellt werden. Dabei werden Pfadprädiktion, Pfadtransformation und Benutzerführung grundlegend überarbeitet und ergänzt.

Da sich die bisher bekannten Konzepte für haptische Schnittstellen nur bedingt für weiträumige haptische Interaktion eignen, wird in Kapitel 5 ein neuer Typ haptischer Schnittstellen vorgestellt, die sogenannten semi-mobilen haptischen Schnittstellen. Durch eine Aufteilung von weiträumiger Bewegung und haptischer Rückkopplung auf verschiedene Subsysteme erlauben diese Schnittstellen haptische Interaktion bei gleichzeitiger uneingeschränkter Bewegung in einer beschränkten Benutzerumgebung.

Die prototypische Realisierung einer semi-mobilen haptischen Schnittstelle wird im Detail in Kapitel 6 dargelegt. Neben dem mechanischen Entwurf, der auf einer innovativen Kinematik basiert, und einer speziell entwickelten verteilten Steuerungselektronik wird dabei vor allem auf die regelungstechnische Realisierung der Trennung von weiträumiger Bewegung und haptischer Interaktion Wert gelegt.

Wie die in den Kapiteln 3–6 beschriebenen Verfahren und Aufbauten zu einem Telepräsenzsystem zusammengefügt werden können, wird in Kapitel 7 beschrieben. Neben der modularen Architektur, die eine Rekonfiguration des Systems zur Laufzeit erlaubt, werden auch die Realisierungen der weiteren für das Telepräsenzsystem benötigten Komponenten vorgestellt. Hierunter fallen z. B. auch die Realisierung des mobilen Teleoperators und der audio-visuellen Schnittstelle.

In Kapitel 8 werden die in dieser Arbeit vorgestellten Neuerungen anhand einiger Experimente auf ihre korrekte Funktion und ihre Praxistauglichkeit untersucht. Dabei wird vor allem auf die Systemsicht, also das korrekte Zusammenspiel aller Komponenten, und das Funktionieren des Gesamtsystems Wert gelegt.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit werden noch einmal in Kapitel 9 zusammengefasst. Außerdem wird ein Ausblick auf künftige Weiterentwicklungen des hier vorgestellten Telepräsenzsystems gegeben.

Stand der Forschung

Sowohl die weiträumige Bewegung als auch die haptische Interaktion mit entfernten realen Umgebungen oder virtuellen Welten sind seit vielen Jahren bearbeitete Forschungsgebiete. Ein guter Überblick über die Breite dieser Gebiete und aktuelle Arbeiten ist z. B. in [16, 17] zu finden.

In diesem Kapitel sollen bestehende Arbeiten auf diesen Gebieten daraufhin untersucht werden, ob und zu welchem Grad sie für den Einsatz in weiträumigen Telepräsenzsystemen geeignet sind. Dabei ist vor allem zu beachten, dass ein hoher Immersionsgrad gewährleistet ist. Das lässt sich dadurch erreichen, dass die Bedienung auf der Benutzerseite möglichst transparent, d. h. für den Benutzer möglichst unsichtbar, ist. Konkret heißt das, dass er weder durch die Bedienung von Geräten noch durch Beschränkungen seiner Bewegungsfreiheit oder durch abstrakte Metaphern an die Existenz der Benutzerumgebung erinnert und damit von der Zielumgebung abgelenkt werden darf.

2.1 Weiträumige Bewegung

Das größte Problem, das sich bei weiträumiger Bewegung in virtuellen und realen Umgebungen stellt, ist der Konflikt zwischen der begrenzten Umgebung, in der sich der Benutzer befindet, und der Zielumgebung, die beliebig ausgedehnt sein kann.

Es muss also eine Möglichkeit gefunden werden, die dem Benutzer erlaubt, eine beliebig große ausgedehnte Umgebung aus seiner beschränkten Benutzerumgebung heraus zu explorieren.

2.1.1 Weiträumige Teleoperation

Die weiträumige Teleoperation ist charakterisiert durch das Ausdehnen des Wirkungsbereichs eines mobilen Teleoperators mit den Mitteln der klassischen Teleoperation. Das heißt vor allem, dass auf Immersion, also eine Identifikation mit dem Teleoperator, zu Gunsten einfach zu erstellender Schnittstellen verzichtet wird.

Die hierzu verwendeten Eingabemodi sind sehr vielfältig. Häufig verwendet werden Eingabegeräte für Computerspiele, wie Joystick [98], Lenkrad [13] oder ähnliche Geräte [92]. Um die

Hände des Benutzers freizuhalten, z. B. für teleoperierte Manipulationsaufgaben, werden teilweise Pedalsysteme zur weiträumigen Bewegung des Roboters eingesetzt [36, 82]. In mehreren Arbeiten werden mobile Roboter durch grafische Benutzeroberflächen auf *PDA*s oder stationären Computern [31, 92] ferngesteuert. Auch exotischere Methoden, wie die Steuerung durch Gesten [32], wurden erprobt.

Alle diese Eingabearten haben gemein, dass der Benutzer keine propriozeptiven Eindrücke der Bewegung hat, da er während der Teleoperation fest an seinem Platz sitzt oder steht. Durch den hohen Abstraktionsgrad der Bewegungssteuerung sind diese Hilfsmittel für den Einsatz in weiträumigen Telepräsenzsystemen nicht geeignet.

2.1.2 Mechanische Bewegungsschnittstellen

Die Gruppe der mechanischen Bewegungsschnittstellen wurde überwiegend für Anwendungen der virtuellen Realität entwickelt, für die Immersion von größter Bedeutung ist. Somit sind sie ebenso für den Einsatz in Telepräsenzsystemen geeignet. Die Grundidee ist hierbei, das Gehen als natürliche Fortbewegungsart des menschlichen Benutzers zuzulassen. Um allerdings zu vermeiden, dass der Benutzer dabei an die Ränder seiner beschränkten Umgebung stößt, werden Bewegungsschnittstellen eingesetzt, die die Bewegung des Benutzers aufnehmen und ihn somit auf der Stelle halten.

Eine passive Bewegungsschnittstelle, d. h. ohne eigene Antriebe, wurde in [50] vorgestellt. Dabei läuft der Benutzer auf einer mit freilaufend gelagerten Kugeln besetzten Fläche, die zu den Rändern hin leicht ansteigt. Durch die Schwerkraft wird er stets in der Mitte dieser Fläche gehalten und kann so frei umhergehen. Eine weitere passive Bewegungsschnittstelle ist die kommerzielle Entwicklung *VirtuSphere*¹⁵, bei der der Benutzer innerhalb einer großen, passiv gelagerten Kugel läuft.

Weiter verbreitet sind aktive Bewegungsschnittstellen, wie z. B. Laufbänder, die es sowohl in ein-dimensionaler Ausführung [19] als auch in der Erweiterung auf zwei Dimensionen [27, 48, 52, 53] gibt. Eine weitere Gruppe der aktiven Bewegungsschnittstellen ist durch solche Systeme gegeben, bei denen der Benutzer auf Fußtrittchen läuft, die der Fußbewegung folgen. Auch solche Systeme gibt es in ein- [55] und mehrdimensionaler Ausführung [28, 55, 95, 110]. Um eine Weiterentwicklung des Laufbandansatzes handelt es sich bei dem in [54] vorgestellten *Circula-Floor*, der dem Benutzern erlauben soll, auf mobilen Bodenplatten zu laufen.

Eine Gemeinsamkeit aller mechanischen Bewegungsschnittstellen ist, dass die Realitätsnähe der Fortbewegung zumindest fragwürdig ist. Ebenso fragwürdig ist, ob durch das Resultat ein so großer mechanischer Aufwand gerechtfertigt werden kann. Hinzu kommt bei den aktiven Systemen der nicht unerhebliche Regelungsaufwand. Während für die verschiedenen Varianten des Laufbands eventuell schon eine reaktive Regelung genügt, so ist doch für die anderen vorgestellten Systeme eine zuverlässige Prädiktion des Benutzers und vor allem seiner Fußbewegungen unabdingbar.

¹⁵ <http://www.virtusphere.com>

2.1.3 Algorithmische Lösungen für weiträumige Bewegung

In eine komplett andere Richtung geht der Versuch, die weiträumige Bewegung ohne zusätzliche Geräte nur durch algorithmische Lösungen zu ermöglichen. Dabei wird allerdings häufig auf sehr abstrakte Fortbewegungsmetaphern, wie das Gehen auf der Stelle [87, 96, 104] zurückgegriffen. Noch weniger dem natürlichen Fortbewegungsempfinden entspricht die Navigation in einer skalierten *World in Miniature*, wie sie z. B. in [67] vorgeschlagen wird.

Vielversprechender ist ein noch junger Typ von Algorithmen, zu denen die Verfahren *redirected walking* [63, 85, 86] und *Bewegungskompression* [77] gehören. Diese Verfahren gehören streng genommen nicht zu den Bewegungsschnittstellen. Vielmehr erlauben sie die Verwendung der natürlichen Bewegungsschnittstelle, also das natürliche Gehen mit Rückkopplung durch Kontakt mit dem Boden, indem sie einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt der Bewegungsdaten einführen.

Beide arbeiten nach dem Prinzip, den geplanten Pfad des Benutzers in der Zielumgebung so zu transformieren, dass er in die Benutzerumgebung passt. Der Benutzer, der anschließend visuell auf diesem transformierten Pfad geführt wird, soll den Eindruck haben, auf seinem ursprünglichen, nicht transformierten, Pfad zu gehen. Dabei macht man sich zu Nutze, dass, wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, kleine Abweichungen zwischen visueller und propriozeptiver Wahrnehmung zu Gunsten der visuellen Eindrücke ausgeglichen werden.

Beide Verfahren unterscheiden sich jedoch grundlegend in der Art der Pfadtransformation. Beim *redirected walking* wird die Pfadtransformation durch Rotationen maskiert. Das bedeutet, dass der Benutzer bei schnellen rotatorischen Bewegungen durch langsames oder schnelleres Drehen des Proxys dazu veranlasst wird, sich zum Inneren der Benutzerumgebung zu orientieren. Ein Ansatz, der dann seine Schwächen zeigt, wenn der Benutzer beabsichtigt, über große Strecken hinweg geradeaus zu gehen. Die *Bewegungskompression* arbeitet dagegen mit einer stetigen Verkrümmung des Pfads. Da dieses Verfahren auch in dieser Arbeit verwendet und substanziell erweitert wird, sei für eine tiefer gehende Erläuterung auf die Kapitel 3 und 4 verwiesen.

2.2 Haptische Schnittstellen

Die Zahl der Arbeiten, die sich mit der Darstellung haptischer Sinneseindrücke beschäftigt, ist sehr groß und wächst ständig. In diesem Abschnitt sollen deshalb die verschiedenen Konzepte haptischer Schnittstellen vorgestellt und kurz beschrieben werden. Dabei soll hier vor allem das Potenzial der verschiedenen Systeme für die weiträumige Telepräsenz untersucht werden, d. h. der Schwerpunkt liegt auf Arbeitsraumbetrachtungen und der Möglichkeit, Kräfte realistisch darzustellen. Daneben gibt es selbstverständlich noch weitere offene Fragen aus dem Gebiet der haptischen Schnittstellen. Diese werden, soweit sie im Interesse dieser Arbeit stehen, in den Kapiteln 5 und 6 behandelt. Für solche Gesichtspunkte, die in dieser Arbeit von geringem Interesse sind, sei der Leser auf weiterführende Literatur, wie z. B. [46] verwiesen.

2.2.1 Tragbare haptische Schnittstellen

Die erste wichtige Gruppe von haptischen Schnittstellen sind die *tragbaren haptischen Schnittstellen*. Diese sind nicht fest mit ihrer Umgebung verbunden, sondern werden vom Benutzer getragen. Neben solchen Systemen, die in der Hand getragen werden und nur geringe inertielle Momente und seltener auch Kräfte erzeugen können [44, 102, 108], wird diese Gruppe hauptsächlich von den sogenannten Exoskeletten gebildet.

Solche Exoskelette sind häufig serielle Roboterkinematiken, die den Arm des Benutzers umschließen [8] und so durch entsprechende Ansteuerung Kräfte darstellen können. Die Ausprägungen dieses Konzepts umfassen auch alternative Kinematiken, wie Parallel-Kinematiken [58], und besondere Antriebskonzepte. So wurden für die tragbaren haptischen Schnittstellen pneumatische Antriebe [51] und die Kraftübertragung durch Seilzüge [45] untersucht. Neben diesen aktiv angetriebenen Schnittstellen wurden auch solche entwickelt, die durch Versteifung dazu in der Lage sind, einen bestimmten Widerstand darzustellen [75].

Obwohl sich tragbare haptische Schnittstellen wegen ihrer Mobilität und ihrem damit nahezu unbegrenzten Arbeitsraum grundsätzlich gut für die weiträumige Telepräsenz eignen, weisen sie doch erhebliche Nachteile auf. Zum Einen müssen diese Schnittstellen vom Benutzer getragen werden, was vor allem bei schwereren Kinematiken zur Ermüdung und durch die damit verbundene größere Anstrengung bei bestimmten Bewegungen zu einer Minderung des Telepräsenzeindrucks führen kann. Zum Anderen werden die durch die Darstellung der Kräfte am Endeffektor entstehenden Gegenkräfte über die Befestigung der Manipulatorbasis auf den Benutzer abgeführt, was wiederum der Immersion abträglich ist. Der wohl massivste Nachteil besteht allerdings darin, dass sich mit tragbaren haptischen Schnittstellen Kräfte, die aus bodenverbundenen Objekten resultieren, nur unzureichend darstellen lassen [88]. So ist es mit einem solchen System z. B. nicht möglich, Wände realistisch darzustellen.

2.2.2 Boden- und deckengebundene haptische Schnittstellen

Die zweite große Gruppe der haptischen Schnittstellen sind die *boden- bzw. deckengebundenen haptischen Schnittstellen*. Diese sind in der Umgebung des Benutzers, meist an Boden oder Decke, fest verankert, so dass die bei der haptischen Darstellung entstehenden Kräfte in die Umgebung abgeführt werden können. Dies verbessert nach [88] besonders die Darstellungsqualität von Kontakten mit festen bodenverbundenen Objekten und erlaubt, je nach Bauart, die präzise Darstellung großer Kräfte.

Dieses Konzept ist so erfolgreich, dass mehrere Systeme, wie das *Phantom Haptic Device*¹⁶ oder das *omega.x*¹⁷, kommerziell erhältlich sind. An diesen Systemen sieht man auch die Vielfältigkeit der eingesetzten Kinematiken. Während das *Phantom* mit einer seriellen Kinematik realisiert wurde, besitzt *omega.x* eine Parallelkinematik. Beide Schnittstellen werden mit Elektromotoren

¹⁶ <http://www.sensable.com/>

¹⁷ <http://www.forcedimension.com/>

angetrieben, es wurden aber auch schon alternative Antriebskonzepte, wie magnetische Lorenzkräfte [106], erprobt. Alle diese Geräte sind aber für die Nutzung am Schreibtisch ausgelegt und haben einen entsprechend kleinen Arbeitsraum, so dass sie nur Mikromanipulation erlauben. Für weiträumige haptische Manipulation sind sie schon wegen der ihrer Größe entsprechenden relativ geringen darstellbaren Kräfte ungeeignet.

Um den Arbeitsraum solcher haptischer Schnittstellen auf eine Größe zu erweitern, die ungefähr dem Arbeitsraum des menschlichen Arms entspricht, und die Entwicklung spezieller Robotersysteme zu vermeiden, wird in einer Vielzahl von Arbeiten auf Industrieroboter [20, 21, 49, 109] zurückgegriffen. Diese Systeme sind allerdings üblicherweise auf schnelle und präzise Endeffektorpositionierung ausgelegt und nicht auf die realistische Darstellung von Kräften. Ihr Arbeitsraum ist zwar größer als der der vorgenannten haptischen Schnittstellen, aber für weiträumige Exploration ist er zu stark eingeschränkt.

In den letzten Jahren hat vor allem die Entwicklung großer haptischer Schnittstellen an Gewicht gewonnen. Diese Systeme sind teilweise sehr speziell auf bestimmte Anwendungen hin entwickelt worden und erweitern den Arbeitsraum nur in die für diese Anwendungen interessanten Dimensionen. So hat die in [9] vorgestellte Schnittstelle einen sehr hohen Arbeitsraum mit sehr kleiner Grundfläche. Mit der Entwicklung von hyperredundanten seriellen Kinematiken [105] versucht man durch redundante Freiheitsgrade Arbeitsraumbeschränkungen, die aus singulären Konfigurationen entstehen, zu vermeiden. Solche Systeme haben üblicherweise einen großen Arbeitsraum, der dem Benutzer in eingeschränktem Rahmen Bewegungen erlaubt. Komplette freie Bewegung innerhalb der Benutzerumgebung ist allerdings auch hier nicht möglich. Ein ganz anderer Weg wird in [10] eingeschlagen. Die Kraftübertragung auf den Arm des Benutzers erfolgt über Seilzüge, die in den Ecken der Benutzerumgebung angebracht sind. Hierdurch kann der Benutzer jeden Punkt der Grundfläche erreichen, allerdings sind seine rotatorischen Freiheitsgrade stark eingeschränkt, da er sich sonst in den Seilen verfängt.

Zusammenfassend gilt also, dass auch boden- bzw. deckengebundene haptische Schnittstellen trotz ihrer überlegenen Darstellungsqualität für echte weiträumige Telepräsenz ungeeignet sind.

2.2.3 Mobile haptische Schnittstellen

Die noch junge dritte Gruppe von haptischen Schnittstellen, die hier betrachtet werden soll, sind die *mobilen haptischen Schnittstellen* [6, 33, 78]. Hierbei handelt es sich um zumeist kleinere bodengebundene Schnittstellen, die auf einer mobilen Plattform befestigt wurden. Diese Systeme erlauben durch die Kombination aus Plattformbewegung und Kraftregelung gleichzeitige haptische Interaktion und weiträumige Bewegung. Diese Fähigkeit ist allerdings durch den vor allem bei nicht-holonomen Plattformen erheblich gestiegenen Aufwand bei der Regelung (in [76] sehr ausführlich dargelegt) teuer erkauft. Hinzu kommen neue limitierende Faktoren in der Darstellungsqualität. Diese sind zum Einen die Steifigkeit der Plattform, die zumeist durch die

Räder bestimmt wird, und zum Anderen die Lokalisierungsgüte der Plattform. Gerade letzteres stellt ein erhebliches Problem dar, da die Selbstlokalisierung mittels Odometrie hierfür zu ungenau ist, so dass ein externes Lokalisierungssystem benötigt wird.

2.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die bestehenden Arbeiten zu den beiden Kernthemen dieser Arbeit, weiträumige Bewegung und haptische Interaktion, überblicksartig vorgestellt und auf ihre Eignung für die weiträumige Telepräsenz untersucht. Dabei stand vor allem die Möglichkeit, dem Benutzer gleichzeitige und konsistente visuelle, propriozeptive und haptische Eindrücke der entfernten Umgebung zu vermitteln, im Mittelpunkt.

Während unter den verschiedenen Bewegungsschnittstellen mehrere Konzepte grundsätzlich geeignet sind, um ein System für die weiträumige Telepräsenz zu realisieren, sind vor allem bei den haptischen Schnittstellen die Möglichkeiten stark limitiert, eine Auffassung, die sich auch mit den Ergebnissen der in [65] vorgestellten Studie deckt.

Bei den Bewegungsschnittstellen zeigen sich vor allem die algorithmischen Lösungen als vielversprechend, weshalb in dieser Arbeit die weiträumige Bewegung auf der Bewegungskompression basiert. Dieses Verfahren, wie es in [76] vorgestellt wird, enthält noch einige *ad hoc*-Lösungen und wird in den nächsten Kapiteln systematisch überarbeitet und erweitert. Bei der Wahl der haptischen Schnittstelle konnte keines der existierenden Systeme überzeugen, so dass ein neuer Typ haptischer Schnittstellen konzipiert und an einem beispielhaften System entwickelt wird. Diese sogenannten semi-mobilen haptischen Schnittstellen kombinieren die Vorteile von mobilen und bodengebundenen haptischen Schnittstellen und sind speziell auf die Verwendung in weiträumigen Telepräsenzsystemen mit Bewegungskompression abgestimmt.

Bewegungskompression zur weiträumigen telepräsenten Bewegung

Wie schon in Abschnitt 2.1 beschrieben, erlaubt der Einsatz des Verfahrens der Bewegungskompression einem Benutzer, durch natürliches Umhergehen aus einer beschränkten Benutzerumgebung eine beliebig große Zielumgebung zu erkunden. Da dieses Verfahren grundlegend für die in Kapitel 4 vorgestellten weiterführenden Methoden ist, soll es in diesem Kapitel detailliert erläutert werden. Dabei folgen die Ausführungen im Wesentlichen den Darstellungen aus [76], unterscheiden sich aber dort in wichtigen Details, wo zur Vorbereitung späterer Erweiterungen eine größere Allgemeinheit vonnöten ist.

3.1 Überblick über die Bewegungskompression

Das Verfahren der Bewegungskompression macht sich die natürliche Reglereigenschaft des Menschen beim Folgen von Pfaden, wie sie in Abschnitt 1.1.2 schon beschrieben wurde, zu Nutze. Dabei passt der Mensch basierend auf seiner aus visuellen und propriozeptiven Eindrücken geschätzten Lage im Raum stets die Richtung seiner Fortbewegung an, um einem gewünschten Pfad zu folgen. Im Fall der telepräsenten Fortbewegung werden die visuellen Eindrücke aus Sicht des Proxys über ein immersives Display, z. B. ein Head-Mounted-Display, aus der entfernten Zielumgebung vermittelt. Hierdurch nimmt der Benutzer visuell nur die Zielumgebung wahr und hat den Eindruck, die Lage des Proxys einzunehmen. Da der visuelle Informationskanal für die Navigation der wichtigste Sinn ist, navigiert der Benutzer in der Zielumgebung und hat, wenn die Bewegung des Proxys die Benutzerbewegungen reproduziert, den Eindruck sich tatsächlich dort zu bewegen. Da sich der Benutzer hierdurch mit dem Proxy identifiziert, wird im Folgenden häufig auf eine Unterscheidung verzichtet, so dass z. B. von der Lage des Benutzers in der Zielumgebung gesprochen wird.

Bei der telepräsenten Fortbewegung beabsichtigt der Benutzer, einem beliebigen *Zielpfad* in der Zielumgebung zu folgen. Da dieser Pfad im Allgemeinen aber nicht in die üblicherweise räumlich stark eingeschränkte Benutzerumgebung passt, wird er durch eine nichtlineare Transformation zum *Benutzerpfad* so verkrümmt, dass er weder die Ränder der Benutzerumgebung

noch in der Benutzerumgebung liegende Hindernisse schneidet. Während sich der Benutzer in der Zielumgebung bewegt, wird seine Lage so beeinflusst, dass er kleine Orientierungsfehler erfährt, die er den Modellen zur menschlichen Navigation entsprechend ausregelt. Hierdurch wird er auf dem verkrümmten Benutzerpfad geführt, während er den visuellen Eindruck hat, auf dem ursprünglich beabsichtigten Zielpfad zu gehen. Da die visuell wahrgenommene Lage bei der Navigation überwiegt, stellen die hierdurch entstandenen Inkonsistenzen zwischen Propriozeption und Gesichtssinn kein Problem dar so lange diese Inkonsistenzen klein sind. Für die Bewegungskompression ergeben sich daraus folgende Randbedingungen: Der Krümmungsunterschied zwischen den Pfaden muss minimal sein und die relative Bewegung entlang der Pfade muss konsistent sein. Bei dem zweiten Punkt spricht man auch von *Längen- und Winkeltreue*.

3.1.1 Bewegungskompression als algorithmisches Framework

Die Bewegungskompression lässt sich dabei als algorithmisches Framework [124] betrachten, das aus drei Modulen besteht. Diese Module sind *Pfadprädiktion*, *Pfadtransformation* und *Benutzerführung*¹⁸, für die in [77, 79, 80] beispielhafte Realisierungen vorgestellt wurden. Dabei können alle drei Module durch, z. B. für bestimmte Anwendungen optimierte, andere Realisierungen ausgetauscht werden, wobei allerdings darauf zu achten ist, dass alle Module bezüglich ihrer Pfaddarstellung kompatibel sind, wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

Der erste Schritt bei der Bewegungskompression ist stets die *Pfadprädiktion*. Die Aufgabe der Pfadprädiktion ist es, eine möglichst gute Vorhersage des Zielpfads zu geben. Diese Prädiktion kann verschiedene Eingangsgrößen haben. Die wichtigste dieser Größen ist die aktuelle Lage des Benutzers in der Zielumgebung, allerdings sind auch Prädiktionsalgorithmen, die die Historie der Bewegung betrachten, denkbar. Bei bekannten Zielumgebungen kann es sinnvoll sein, die Geometrie der Zielumgebung oder besondere Landmarken in die Pfadprädiktion einfließen zu lassen. Als Anfangspunkt eines vorhergesagten Pfads wird dabei der Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}$ gewählt. Bei naiver Betrachtung entspricht $\underline{\rho}$ dabei stets der Benutzerposition \underline{x}_T in der Zielumgebung, was allerdings, wie in Abschnitt 4.3.5 gezeigt, nicht immer die beste Annahme ist.

Der von der Pfadprädiktion gefundene Pfad wird in der *Pfadtransformation* unter Beibehaltung der Länge – eine Skalierung findet also nicht statt – so transformiert, dass er komplett innerhalb der Benutzerumgebung liegt. Der entstehende Benutzerpfad unterscheidet sich vom Zielpfad nur in seiner Krümmung, insbesondere sind die Startpunkte und -orientierungen der beiden Pfade relativ zur Benutzerposition in beiden Umgebungen gleich. Da der Krümmungsunterschied der Pfade minimal gehalten werden soll, bietet es sich an, die Pfadtransformation wie in Abschnitt 4.1.1 als Optimierungsproblem darzustellen. Aber auch algorithmische Lösungen, wie sie in [68] vorgestellt und in Abschnitt 4.1.4 substanziell erweitert werden, sind möglich.

¹⁸ In [76] werden die drei Module auch mit *Pfadprädiktion*, *Pfadkompression* und *Bewegungsexpansion* bezeichnet

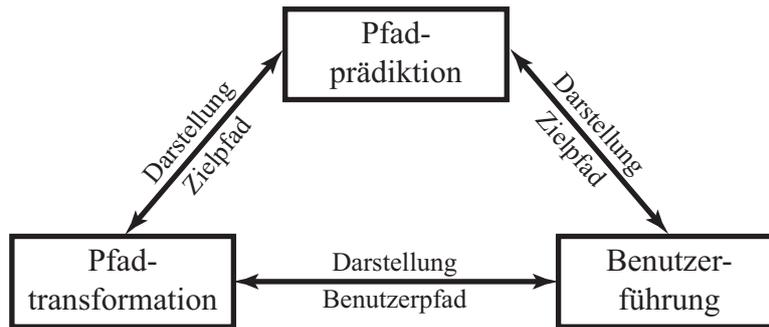


Abbildung 3.1: Kompatibilitätsbedingungen für die drei Module der Bewegungskompression.

Die Aufgabe des dritten Moduls, der *Benutzerführung*, ist es, zu jedem Zeitpunkt eine Transformation ${}^{OU}T_{OU}$, die die Lage des Benutzers in der Benutzerumgebung und des Proxys in der Zielumgebung in Beziehung setzt, zu berechnen. Diese Transformation wird dabei so berechnet, dass die Längen- und Winkeltreue der Bewegung gewährleistet ist. Sie ist eine der grundlegenden Eigenschaften der Bewegungskompression und wird ausführlich in Abschnitt 3.3 beschrieben. Verhielte sich der Benutzer stets ideal, d. h. würde er nie vom Pfad abweichen, wäre damit die Benutzerführung vollständig beschrieben. Da der Benutzer aber teilweise recht stark vom Pfad abweicht, was durch den Einfluss der Bewegungskompression noch verstärkt wird, obliegt es der Benutzerführung, diese Abweichungen wieder auszugleichen. Hierzu wird in Abschnitt 4.3 ein neuer systematischer Ansatz vorgestellt.

3.2 Statische vs. dynamische Bewegungskompression

Das Verfahren der Bewegungskompression kann statisch und dynamisch verwendet werden, d. h. der Pfad wird einmalig vorab oder in jedem Zeitschritt neu berechnet. Beide Vorgehensweisen sind in Abbildung 3.2 grafisch gegenübergestellt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass in beiden Fällen die Benutzerführung in jedem Zeitschritt durchgeführt werden muss, da die nichtlineare Pfadtransformation abhängig von der Position des Benutzers bzw. des Proxys durch eine lineare Transformation dargestellt werden muss.

Bei *statischer* Bewegungskompression wird zu Beginn einmalig der Zielpfad genau vorhergesagt. Der Benutzerpfad wird dann mittels numerischer Lösung optimal in die Benutzerumgebung transformiert, so dass der Benutzer auf diesem Pfad geführt werden kann. Ein solches statisches Vorgehen ist allerdings eher von akademischem Nutzen, da sich das Verhalten menschlicher Nutzer üblicherweise nur für einen sehr kurzen zeitlichen Horizont gut vorhersagen lässt.

Für den praktischen Einsatz geeignet ist dagegen die *dynamische* Bewegungskompression. Hierbei werden in jedem Zeitschritt Pfadprädiktion und -transformation neu berechnet. Es ist somit nur eine kurzfristige Prädiktion des Pfads nötig, auf deren Basis die Pfadtransformation inkrementell berechnet werden kann. Wegen dieser Eigenschaften wird in den folgenden Kapiteln nur noch die dynamische Bewegungskompression betrachtet.

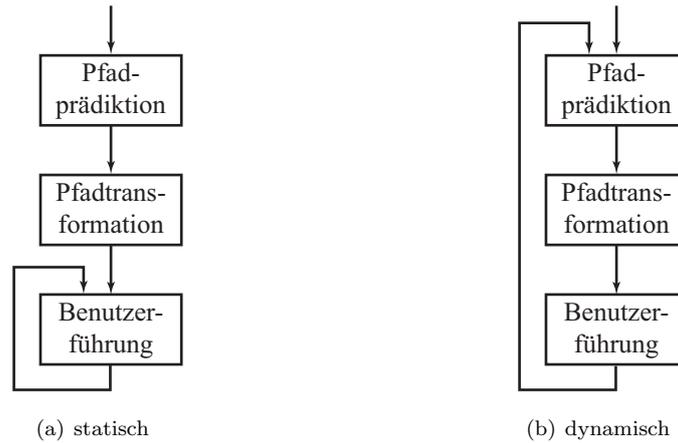


Abbildung 3.2: Vergleich des Ablaufs bei statischer und dynamischer Bewegungskompression.

3.3 Grundlagen der Bewegungskompression

3.3.1 Darstellung ebener Pfade

In diesem Kapitel wurde bisher von *Pfaden* gesprochen, ohne sie genauer zu definieren. Dies soll nun nachgeholt werden. Dabei ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit nur ebene Pfade betrachtet werden, d. h. Pfade, die als in einen zweidimensionalen kartesischen Raum eingebettete eindimensionale Mannigfaltigkeit dargestellt werden können. Hierzu gehören insbesondere die für die Anwendung relevanten Pfade, die in einer zur Gravitation normalen Ebene liegen.

Ein Pfad in diesem Sinne ist z. B. die Projektion der Kopftrajektorie des Benutzers auf den Boden der Benutzerumgebung. Damit ist ein Pfad, obwohl er aus einer diskreten Schrittfolge generiert wird, stets kontinuierlich.

Unter Annahme der Differenzierbarkeit¹⁹ lässt sich ein Pfad durch seine Krümmung, die als stückweise stetige²⁰ Funktion

$$\kappa : [0, s_E] \in \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.1)$$

über dem geschlossenen Intervall $[0, s_E]$ dargestellt wird, beschreiben. Dabei stellt $s \in [0, s_E]$ den Fortschritt entlang des Pfads dar. Der Anfangspunkt des Pfads befindet sich bei $s = 0$ und der Endpunkt des Pfads dementsprechend bei $s = s_E$. Durch die Krümmungsfunktion κ , die Anfangsorientierung ψ_0 und seine Startposition

$$\underline{c}_0 = \begin{bmatrix} c_{x,0} \\ c_{y,0} \end{bmatrix}$$

in kartesischen Koordinaten ist ein Pfad eindeutig bestimmt.

¹⁹ Stetigkeit ist ohnehin vorausgesetzt, da der Benutzer sonst „springen“ würde. Nicht-differenzierbare Pfade lassen sich beliebig genau durch eine kurzzeitige Erhöhung der Krümmung annähern.

²⁰ Stückweise Stetigkeit ist Voraussetzung für die Existenz des Integrals in Gleichung (3.2).

Der Bezug zum kartesischen Koordinatensystem lässt sich durch Integration wiederherstellen. So ist die Orientierung als Funktion der Pfadvariablen durch

$$\psi(s) = \psi_0 + \int_0^s \kappa(t) dt \quad (3.2)$$

gegeben. Unter Beachtung der trigonometrischen Zusammenhänge lassen sich die kartesischen Positionen entlang des Pfads durch nochmalige Integration als

$$\underline{c}(s) = \begin{bmatrix} c_x(s) \\ c_y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x,0} \\ c_{y,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^s \cos(\psi(t)) dt \\ \int_0^s \sin(\psi(t)) dt \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

bestimmen.

Zusammengesetzte Pfade

Gelegentlich wird in dieser Arbeit auch von *zusammengesetzten Pfaden* gesprochen, vor allem im Zusammenhang mit einer vereinfachten Pfaddarstellung mit konstanter Krümmungsfunktion κ . Dies gilt z. B. für gerade Pfade mit $\kappa = 0$. Um auch für diesen Fall Richtungsänderungen zu erlauben, stellt man Pfade dann als stetige Funktionen dar, die stückweise aus Pfaden entsprechend der eingeschränkten Pfaddarstellung zusammengesetzt sind. Solche Pfade bilden die Grundlage für den in Abschnitt 4.1.4 dargestellten inkrementellen Algorithmus zur Pfadtransformation.

3.3.2 Transformation zwischen Benutzer- und Zielumgebung

Für die Bestimmung der linearen Transformation ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU}$ zwischen den beiden Umgebungen wird für Benutzer und Proxy je ein Referenzkoordinatensystem S_{HU} bzw. S_{HT} benötigt, das bei beiden denselben Teil der Anatomie beschreibt. Hierfür bietet es sich an, diese Referenzkoordinatensysteme jeweils in den Kopf von Benutzer und Proxy zu legen.

Die lineare Transformation zwischen den Umgebungen muss zu jedem Zeitschritt nur einmal berechnet werden. Denn ist die Transformation einmal bestimmt, gilt sie für jeden Punkt in der Benutzerumgebung, der in die Zielumgebung transformiert werden soll. Sie gilt insbesondere auch für Handkoordinatensysteme, so dass die relative Lage zwischen Kopf und Hand erhalten bleibt. Der Manipulator des Teleoperators wird vom Benutzer also visuell genau dort wahrgenommen, wo sich entsprechend der efferenten Wahrnehmung seiner Armbewegung die Hand befinden sollte. Ebenso werden alle interessanten Punkte aus der Zielumgebung²¹ mit der inversen Transformation ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU}^{-1}$ in die Benutzerumgebung transformiert, da der Benutzer sonst eine Verzerrung des Raumes wahrnehmen würde.

²¹ Für den von der haptischen Schnittstelle darzustellenden Kraftvektor gilt natürlich dasselbe.

Aufgrund der in Abschnitt 1.1.1 beschriebenen Eigenschaft der Vestibularorgane, immer einen absoluten Bezug zur Richtung der Erdanziehung herstellen zu können, ist die oben beschriebene Grundidee der Bewegungskompression natürlich nur auf die Freiheitsgrade des Kopfs anwendbar, die keine Änderung der relativen Lage zur Schwerkraft hervorrufen. Das heißt also, dass die Bewegungskompression nur die Lage des Benutzers in der Projektion auf die xy -Ebene beeinflussen darf. Die Höhe des Kopfs, sowie Nick- und Rollwinkel bleiben dadurch unbeeinflusst und werden durch eine Einheitstransformation in die andere Umgebung übertragen. Deshalb wird im Folgenden in Zusammenhang mit der Bewegungskompression nur die Projektion des Referenzsystems auf die xy -Ebene, also auf den Boden der jeweiligen Umgebung betrachtet.

Somit ist die Lage des Bezugskordinatensystems S_{HU} des Benutzers in der Benutzerumgebung eindeutig durch den Lagevektor

$$\underline{x}_U = \begin{bmatrix} x_U \\ y_U \\ \phi_U \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

gegeben. Entsprechend beschreibt

$$\underline{x}_T = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ \phi_T \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

die Lage des Bezugskordinatensystems S_{HT} des Proxys in der Zielumgebung. x und y stellen die Position des Ursprungs im jeweiligen Weltkordinatensystem S_{OU} bzw. S_{OT} dar, und ϕ gibt den Winkel zwischen der x -Achse des Weltkordinatensystems und der x -Achse des Bezugskordinatensystems an. Die x -Achse der Koordinatensysteme ist dabei so definiert, dass sie die Vorzugsrichtung von Benutzer bzw. Proxy angibt, d. h. sie ist in Blickrichtung orientiert. Zur einfacheren Darstellung werden im Folgenden \underline{x}_U und \underline{x}_T als Benutzer- bzw. Proxylage bezeichnet, ϕ heißt Orientierung.

Eine für die Bewegungskompression geschicktere Darstellung der Lage von Benutzer und Proxy ist die Darstellung als homogene Transformation zwischen dem Bezugskordinatensystem S_{HU} bzw. S_{HT} und dem jeweiligen Weltkordinatensystem S_{OU} bzw. S_{OT} . Die Transformation

$${}^{OU}\mathbf{T}_{HU} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_U) & -\sin(\phi_U) & x_U \\ \sin(\phi_U) & \cos(\phi_U) & y_U \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

beschreibt die Lage des Benutzers, die Lage des Proxys lässt sich entsprechend durch ${}^{OT}\mathbf{T}_{HT}$ darstellen.

Bei gegebener Transformation zwischen den Weltkordinatensystemen von Benutzer- bzw. Zielumgebung ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU}$ kann die gewünschte Lage des Proxys in der Zielumgebung einfach als

$${}^{OT}\mathbf{T}_{HT} = {}^{OT}\mathbf{T}_{OU} \cdot {}^{OU}\mathbf{T}_{HU} \quad (3.7)$$

berechnet werden.

Gewährleistung der Längen- und Winkeltreue

Um die Längen- und Winkeltreue geeignet darstellen zu können, wird in beiden Umgebungen ein weiteres Koordinatensystem benötigt. Hierbei handelt es sich allerdings nicht wie bei den bisher betrachteten Koordinatensystemen um orthogonale Koordinatensysteme, sondern um die *krummlinigen Pfadkoordinatensysteme* \tilde{S}_U und \tilde{S}_T . Die Lage des Benutzers in einem solchen krummlinigen Koordinatensystem ist dabei wie in Abbildung 3.3 dargestellt eindeutig durch den Fortschritt s entlang des Pfads, den senkrechten Abstand n zum Pfad und durch den Winkel θ zur Tangente am Pfad an der Stelle s bestimmt. Der Ursprung der krummlinigen Pfadkoordinatensysteme liegt dabei am Anfangspunkt \underline{c}_0 des Pfads mit der Anfangsorientierung ψ_0 .

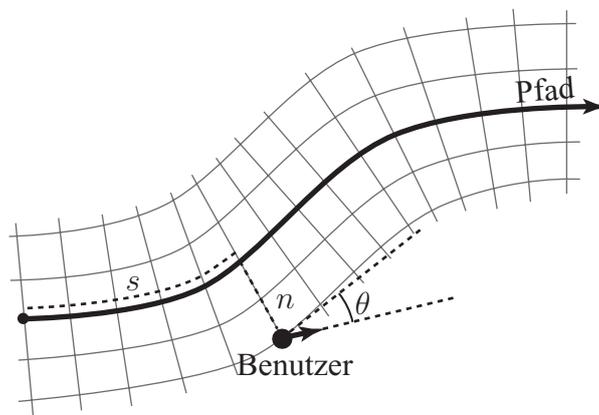


Abbildung 3.3: Die Benutzerlage ist im krummlinigen Pfadkoordinatensystem \tilde{S} eindeutig durch s , n und θ bestimmt.

Mit Hilfe der krummlinigen Pfadkoordinatensysteme lassen sich einfache notwendige und hinreichende Bedingungen für längen- und winkeltreue Fortbewegung formulieren. Den Ausführungen in [76] entsprechend ist die Längentreue einer telepräsenten Fortbewegung genau dann gegeben, wenn die Fortbewegung relativ zum Pfad in beiden Umgebungen gleich ist. Das heißt, dass sich die Bewegungen in tangentialer Richtung und normal zum Pfad in beiden Umgebungen immer entsprechen. Dies ist gewährleistet, wenn zu jedem Zeitpunkt gilt, dass

$$s_T = s_U \text{ und} \quad (3.8)$$

$$n_T = n_U \text{ .} \quad (3.9)$$

Entsprechend gilt für die Winkeltreue, dass die Orientierung relativ zum Pfad stets gleich sein muss, d. h.

$$\theta_T = \theta_U \text{ .} \quad (3.10)$$

In Abbildung 3.3 ist leicht zu sehen, dass die Längentreue der tatsächlichen Bewegung natürlich nur dann gegeben ist, wenn sich der Benutzer auch auf dem Pfad bewegt und nicht von diesem abkommt. Das bedeutet im Idealfall, dass die Bewegung der Kopfs, falls dieser als Referenzsystem gewählt wurde, tatsächlich längentreu ist; für alle weiteren Punkte am Benutzer,

wie z.B. die Hand, gilt dies im Allgemeinen nicht. Diese Forderung wird, mit der gleichen Begründung wie zuvor, zu Gunsten einer konsistenten linearen Transformation der gesamten Benutzerumgebung in die Zielumgebung aufgegeben.

Bestimmung der Transformation

Aus den Bedingungen für die Längen- und Winkeltreue folgt, dass die Lage von Proxy und Benutzer relativ zu den jeweiligen Pfaden gleich ist. Dies wird genutzt, um die Transformation ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU}$ zwischen den beiden Umgebungen zu berechnen. Hierzu wird zunächst die Transformation ${}^{HU}\tilde{\mathbf{T}}_{OU}$ in das krummlinige Koordinatensystem \tilde{S}_U berechnet. Diese Transformation wird mittels Einheitstransformation in das krummlinige Koordinatensystem der Zielumgebung \tilde{S}_T übertragen. Von diesem aus lässt sich durch eine weitere Transformation aus dem krummlinigen in das Weltkoordinatensystem der Zielumgebung ${}^{OT}\tilde{\mathbf{T}}_{HT}$ die Transformation

$${}^{OT}\mathbf{T}_{OU} = {}^{OT}\tilde{\mathbf{T}}_{HT} \cdot \mathbf{I} \cdot {}^{HU}\tilde{\mathbf{T}}_{OU} \quad (3.11)$$

berechnen.

Um die vollständige Transformation zu erhalten, müssen also die beiden krummlinigen Transformationen $\tilde{\mathbf{T}}$ bekannt sein. Dabei stellt die Rücktransformation den einfacheren Fall dar, da sie stets eindeutig definiert ist. Sie ist durch

$${}^{OT}\tilde{\mathbf{T}}_{HT} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_T + \theta_T) & -\sin(\psi_T + \theta_T) & c_{x,T} - n_T \cdot \sin(\psi_T) \\ \sin(\psi_T + \theta_T) & \cos(\psi_T + \theta_T) & c_{y,T} + n_T \cdot \cos(\psi_T) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

gegeben, wobei $\psi_T = \psi_T(s_T)$ und $c_T(s_T)$ wie in den Gleichungen 3.2 und 3.3 definiert sind.

Für die Bestimmung der Vorwärtstransformation wird zunächst der Lotfuß p_l der Benutzerposition auf dem Pfad berechnet. Hieraus lassen sich leicht s_U , n_U und θ_U berechnen. ${}^{HU}\tilde{\mathbf{T}}_{OU}$ wird dann als

$${}^{HU}\tilde{\mathbf{T}}_{OU} = {}^{OU}\tilde{\mathbf{T}}_{HU}^{-1} \quad (3.13)$$

bestimmt, wobei ${}^{OU}\tilde{\mathbf{T}}_{HU}^{-1}$ analog zu Gleichung (3.12) berechnet wird. Das Problem bei der Berechnung der Vorwärtstransformation liegt allerdings in der Bestimmung des Lotfußes, da dieser im Allgemeinen nicht eindeutig ist. Die Auflösung dieser Mehrdeutigkeiten anhand einer Kontinuitätsbedingung ist in [76] beschrieben.

Inkrementelle Berechnung der Benutzerführung

Gerade bei dynamischer Bewegungskompression ist eine Berechnung der Transformation wie in Gleichung (3.11) wenig praxistauglich. In diesem Fall wird der Pfad ständig neu prädiiziert, so dass für die Berechnung der Transformation eine unbegrenzt wachsende Historie von

Pfadstücken benötigt würde. Dieses Problem lässt sich durch Einführung einer inkrementellen Pfadtransformation beheben. Die Transformation ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k}$ zum Zeitpunkt k wird als

$${}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k} = {}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k-1} \cdot \mathbf{T}_{\text{ink},k} \quad (3.14)$$

aus der bisherigen Transformation und einer Inkrementaltransformation $\mathbf{T}_{\text{ink},k}$ berechnet. Für die Bestimmung der Inkrementaltransformation $\mathbf{T}_{\text{ink},k}$ wird nur das Pfadstück beginnend am Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}_{U,k-1}$ und die seitdem aufgetretenen Änderungen in der relativen Lage zum Pfad betrachtet. Mit dem Fortschritt seit dem Planungsbezugspunkt Δs_U , der Lateralbewegung $\Delta n_U = n_{U,k} - n_{U,k-1}$ und der relativen Orientierungsänderung $\Delta \theta_U = \theta_{U,k} - \theta_{U,k-1}$ kann die Inkrementaltransformation ähnlich wie zuvor berechnet werden. Besonders leicht lassen sich nach [68] diese Inkrementaltransformationen berechnen, wenn der Benutzerpfad als Gerade und der Zielpfad als Kreisbogen dargestellt wird.

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Bewegungskompression zur weiträumigen telepräsenten Bewegung weitestgehend so vorgestellt, wie sie in [76] beschrieben ist. Dabei wird der Pfad des Benutzers in der Zielumgebung prädictiert und unter Minimierung des Krümmungsunterschieds so verkrümmt, dass der Pfad komplett in der Benutzerumgebung liegt. Der Benutzer wird auf dem so transformierten Pfad geführt, hat aber den Eindruck, sich auf seinem ursprünglich beabsichtigten Pfad zu bewegen.

Die Bewegungskompression ist ein algorithmisches Framework, für das in diesem Kapitel die grundlegenden Implementierungen vorgestellt wurden. Diese haben aber zum Teil starke Einschränkungen, so ist die Pfadprädiktion wenig systematisch und verlässt sich nur auf die Blickrichtung des Benutzers. Die Pfadtransformation schränkt die möglichen zur Verfügung stehenden Benutzerumgebungen stark ein, da diese konvex sein müssen – eine Forderung, die in realen Räumen zumeist nur sehr kleine Flächen erfüllen können. Die größte Einschränkung stellt allerdings die Benutzerführung dar, da sie, wie in Abschnitt 4.3 gezeigt wird, ohne zusätzliche Korrekturen überhaupt nicht verwendet werden kann.

Im folgenden Kapitel 4 werden neue Verfahren zur Bewegungskompression vorgestellt, die basierend auf den vorhandenen Methoden diese Schwächen angehen und beseitigen. So wird für die Pfadprädiktion in bekannten Zielumgebungen ein neuer systematischer Ansatz vorgestellt, der auf einem Bayes'schen Schätzer zur Bestimmung des momentan anvisierten Wegpunkts des Benutzers basiert. Das Optimierungsproblem für die Pfadtransformation wird für nicht-konvexe Benutzerumgebungen neu formuliert. Anhand der Optimierungsergebnisse wird der Algorithmus zur inkrementellen Echtzeit-Transformation so erweitert, dass in nicht-konvexen Umgebungen die Pfadtransformation effizient berechnet werden kann. Die Benutzerführung wird schließlich um eine Reglerkomponente erweitert, die gewährleistet, dass der Benutzer dem transformierten Pfad folgt, wodurch die Längentreue der Bewegung gegeben ist.

Neue Verfahren für die Bewegungskompression

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Vorgehensweise und die grundlegenden Ideen der Bewegungskompression vorgestellt wurden, sollen in diesem Kapitel die drei funktionalen Module grundlegend überarbeitet werden. Die bisher vorgestellten Verfahren [77, 79, 80, 100] haben teilweise deutliche Nachteile und nutzen die Möglichkeiten der Bewegungskompression nicht voll aus.

So geht die bisherige unregelmäßige Benutzerführung von einem idealisierten Benutzermodell aus. Dadurch ist sie nicht in der Lage, den Benutzer auf dem transformierten Pfad in der Benutzerumgebung zu geleiten, was zu einem Abweichen vom Pfad und letztendlich zum Verlassen der Benutzerumgebung und einer Kollision mit deren Beschränkungen führt. Aus diesem Grund werden diese Unzulänglichkeiten durch die Pfadprädiktion behoben, was zu einer ungewollten Verflechtung der beiden Module führt und so die Austauschbarkeit gefährdet.

Trotz ihrer großen Wichtigkeit für den gesamten Algorithmus wurde der Pfadprädiktion bisher wenig Beachtung geschenkt. Gerade für bekannte Zielumgebungen fehlt ein systematischer Ansatz, der Informationen über die Zielumgebung mit in die Prädiktion einbezieht.

Die für die Anwendung größte Einschränkung besteht allerdings in der Pfadtransformation, da sich alle bisher vorgestellten Überlegungen stets auf konvexe Benutzerumgebungen beschränken. Eine Erweiterung auf nicht-konvexe Umgebungen würde an den meisten Einsatzorten erlauben, größere Benutzerumgebungen zur Verfügung zu stellen und damit durch den geringeren Kompressionsbedarf die Inkonsistenz zwischen visueller und propriozeptiver Wahrnehmung reduzieren. Aus diesem Grund beginnt dieses Kapitel mit der Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen (Abschnitt 4.1), bevor ein neuer systematischer Ansatz zur Pfadprädiktion in bekannten Zielumgebungen (Abschnitt 4.2) vorgestellt wird. Das Kapitel schließt mit der grundlegenden Überarbeitung der Benutzerführung (Abschnitt 4.3).

4.1 Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen

Bisher betrachtet das Verfahren der Bewegungskompression nur konvexe Benutzerumgebungen. Dies hat allerdings den Nachteil, dass immer ein großer freier Raum als Benutzerumgebung zur Verfügung stehen muss. Eine wesentlich verbesserte Raumausnutzung kann durch Verwendung

nicht-konvexer Benutzerumgebungen erreicht werden, da dann auch unregelmäßig geformte oder durch Säulen gestützte Räume als Benutzerumgebung verwendet werden können.

Um eine systematische Lösung für das Transformationsproblem zu finden, wird im Folgenden die Pfadtransformation als Optimierungsproblem formuliert. Dabei wird vor allem auf die Darstellung der durch die nicht-konvexe Umgebung gegebenen Randbedingungen eingegangen. Das Optimierungsproblem wird dann so modifiziert, dass es sich mit Standard-Optimierungsverfahren lösen lässt.

4.1.1 Formulierung als dynamisches Optimierungsproblem

Wie schon in Abschnitt 3.3.1 beschrieben werden im Rahmen der Bewegungskompression Pfade über ihre Krümmungsfunktion $\kappa(s)$ beschrieben. Dementsprechend soll also zu der gegebenen Krümmungsfunktion $\kappa_T(s)$ des Zielpfads die Krümmungsfunktion $\kappa_U(s)$ des transformierten Benutzerpfads gefunden werden. Startpunkt und -orientierung der beiden Pfade sind dabei durch die Planungsbezugspunkte $\underline{\rho}_T$ und $\underline{\rho}_U$ in der Ziel- bzw. Benutzerumgebung gegeben, deren relative Lage zum Benutzer in beiden Umgebungen gleich ist.

Da der Krümmungsunterschied zwischen beiden Pfaden minimal sein soll, um eine möglichst geringe Inkonsistenz zwischen visueller und propriozeptiver Wahrnehmung zu erreichen, ist κ_U so zu wählen, dass das Gütefunktional

$$J = \int_0^{s_E} \left(\kappa_T(s) - \kappa_U(s) \right)^2 ds \quad (4.1)$$

minimiert wird. Um die geometrischen Eigenschaften eines Pfads zu bewahren, sind dabei als Gleichheitsbedingungen die funktionalen Beziehungen zwischen der Pfadvariablen s und den kartesischen Koordinaten

$$\begin{aligned} \frac{d\underline{c}_U}{ds} &= \begin{bmatrix} \cos \psi_U(s) \\ \sin \psi_U(s) \end{bmatrix} \\ \frac{d\psi_U}{ds} &= \kappa_U(s) \end{aligned} \quad (4.2)$$

zu beachten.

Die Einschränkungen, die aus der räumlichen Beschränkung der Benutzerumgebung resultieren, werden darüber hinaus durch die Ungleichheitsbedingungen

$$\underline{g}(\underline{c}_U) \leq \underline{0} \quad (4.3)$$

gegeben. Diese Ungleichheitsbedingungen, die noch genau zu spezifizieren sind, sind genau dann erfüllt, wenn sich jeder Punkt des Pfads innerhalb der nicht-konvexen Benutzerumgebung befindet.

Der Versuch, für dieses Optimierungsproblem eine analytische Lösung zu finden, muss allerdings scheitern, da mehrere Voraussetzungen für die gängigen Verfahren zur nichtlinearen Optimierung, wie z. B. Karush-Kuhn-Tucker, verletzt sind.

4.1.2 Analyse der Randbedingungen

Um eine einfache und handhabbare Beschreibung der geometrischen Nebenbedingungen zu erhalten, muss eine geeignete Darstellung der nicht-konvexen Umgebungen gefunden werden. Dabei macht man sich zu Nutze, dass jede konvexe Umgebung durch ein Polygon beliebig angenähert werden kann. Diese Umgebungsbeschreibung hat ihre Nützlichkeit schon bei der Pfadtransformation für konvexe Umgebungen gezeigt und soll auch hier verwendet werden. Im Folgenden werden also nur noch Polygone betrachtet, auf Umgebungen mit gebogenen Begrenzungen soll verzichtet werden, da sich auch diese durch Polygone annähern lassen.

Auch nicht-konvexe Umgebungen lassen sich durch eine Menge von konvexen Polygonen darstellen. Hierzu wird die nicht-konvexe Umgebung X durch ihre konvexe Hülle C und eine Menge von ausgesparten Polygonen I_i dargestellt. Die ausgesparten Polygone lassen sich ihrerseits stets in konvexe Teilpolygone zerteilen, so dass die I_i im Folgenden als konvex angenommen werden können.

Eine solche Darstellung einer nicht-konvexen Umgebung X als

$$X = C - I_1 - \dots - I_n \quad (4.4)$$

ist in Abbildung 4.1 beispielhaft gezeigt. Im Kontext der Bewegungskompression heißen die ausgesparten Polygone I_i *innere Objekte*, da sie typischerweise reale Objekte darstellen, die die Benutzerumgebung einschränken.

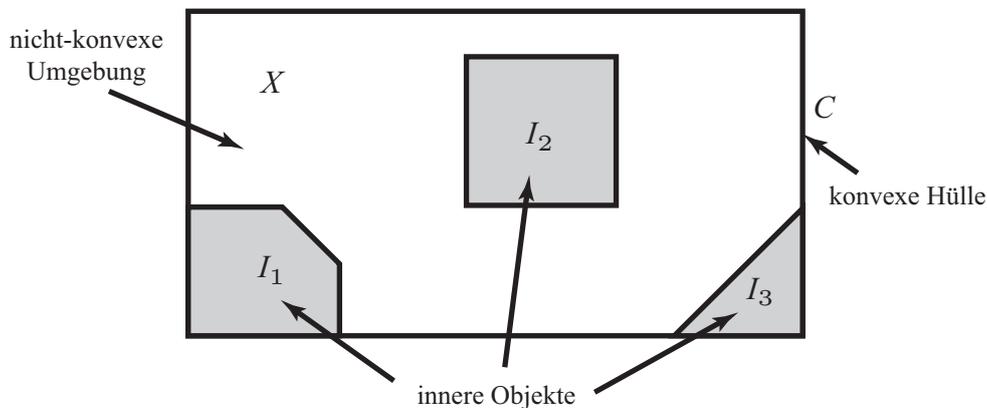


Abbildung 4.1: Beispiel für eine nicht-konvexe Umgebung X dargestellt durch ihre konvexe Hülle C und die inneren Objekte $I_1 \dots I_3$.

Mit einer solchen Darstellung der nicht-konvexen Umgebung lassen sich die Ungleichheitsnebenbedingungen aus Gleichung (4.3) einfach darstellen. Dabei werden die Nebenbedingungen für die konvexe Hülle und die inneren Objekte getrennt betrachtet.

Der erste Satz von Nebenbedingungen

$$\underline{g}_C(\underline{c}_U) \leq \underline{0} \quad (4.5)$$

beschreibt, dass sich ein Punkt \underline{c}_U des Pfads innerhalb der konvexen Hülle befindet. Dies entspricht den Ungleichheitsbedingungen aus dem konvexen Fall.

Die Nebenbedingungen lassen sich dabei getrennt für jede Begrenzungsgerade der konvexen Hülle als

$$g_C^i(\underline{c}_U) = (\underline{p}_i - \underline{c}_U)^T \cdot \underline{n}_i \leq 0 \quad (4.6)$$

beschreiben, wobei \underline{p}_i einen beliebigen Punkt auf der Geraden i und \underline{n}_i den Normalenvektor auf dieser Geraden darstellt. Der Normalenvektor ist dabei so definiert, dass er immer vom Hindernis weg in das Innere der Benutzerumgebung zeigt.

Für jedes innere Objekt I_i gibt es eine weitere Nebenbedingung

$$g_{I_i}(\underline{c}_U) \leq 0 \quad , \quad (4.7)$$

die sicher stellt, dass sich \underline{c}_U nicht innerhalb des inneren Objekts I_i befindet. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass diese Bedingung einzeln für die k Wände des Objekts I_i überprüft wird. Die daraus resultierenden Ergebnisse müssen konjunktiv verknüpft werden, da sich ein \underline{c}_U nur dann innerhalb des Objekts befindet, wenn er sämtliche Randbedingungen für dieses Objekt verletzt. Dementsprechend gilt für g_{I_i} also

$$g_{I_i}(\underline{c}_U) = \min \left(g_{I_i}^1(\underline{c}_U), \dots, g_{I_i}^k(\underline{c}_U) \right) \quad , \quad (4.8)$$

wobei die $g_{I_i}^k$ entsprechend Gleichung (4.6) definiert sind.

Insgesamt sind die Nebenbedingungen für die Optimierung also durch

$$\underline{g}(\underline{c}_U) = \begin{bmatrix} \underline{g}_C(\underline{c}_U) \\ g_{I_1}(\underline{c}_U) \\ \vdots \\ g_{I_n}(\underline{c}_U) \end{bmatrix} \leq \underline{0} \quad (4.9)$$

gegeben. Um eine solche Darstellung zu erreichen, muss sich die Polygondarstellung der inneren Objekte allerdings leicht von der Polygondarstellung der konvexen Hülle unterscheiden. Die Normalenvektoren der konvexen Hülle sind so definiert, dass sie zur Mitte hin, also in den gültigen Bereich der Benutzerumgebung zeigen. Die Normalenvektoren der inneren Objekte zeigen auch in den gültigen Bereich der Benutzerumgebung. Dies wird allerdings dadurch erreicht, dass sie von den inneren Objekten aus nach außen gerichtet sind.

Bestünde die Möglichkeit, die nicht-konvexe Umgebung wie in [90] durch einen Diffeomorphismus in ein konvexes Gebiet zu überführen, könnte das Optimierungsproblem unter Umständen auf das in [76] beschriebene Problem für konvexe Benutzerumgebungen zurückgeführt werden. Ein solches Vorgehen bleibt allerdings auf sternförmige Gebiete beschränkt, da sich mehrfach zusammenhängende Gebiete nicht durch stetige, und damit auch nicht durch differenzierbare, Abbildungen in einfach zusammenhängende Gebiete überführen lassen. Eine Betrachtung, die zwischen sternförmigen und mehrfach zusammenhängenden nicht-konvexen Umgebungen unterscheidet, ist allerdings nicht erstrebenswert, so dass dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wird. Stattdessen wird im folgenden Abschnitt eine für beliebige nicht-konvexe Benutzerumgebungen gültige Lösung des Transformationsproblems gefunden.

4.1.3 Numerische Lösung für die Pfadtransformation

Parametrische Pfaddarstellung

Um den Einsatz etablierter Optimierungsverfahren zu ermöglichen, wird zunächst das dynamische bzw. unendlich dimensionale Optimierungsproblem für die Pfadtransformation in ein statisches, endlich dimensionales Optimierungsproblem überführt. Hierzu wird eine vereinfachte Pfaddarstellung eingeführt, die einen Pfad mit Hilfe eines endlichen Parametersatzes beschreibt.

Bei dieser vereinfachten Pfaddarstellung macht man sich zu Nutze, dass sich ein beliebiger zusammenhängender Pfad als eine Folge von Kreisbögen, sogenannten Momentankreisen, darstellen lässt. Die Krümmungsfunktion κ aus Gleichung (3.1) ist in diesem Fall stückweise konstant, wobei die Momentankrümmung

$$\kappa(s) = \frac{1}{r(s)} \quad (4.10)$$

durch den Radius $r(s)$ des Momentankreises gegeben ist. In dieser Darstellung sind explizit auch Geradenstücke eingeschlossen. In diesem Fall gilt $\kappa(s) = 0$.

Betrachtet man den Pfad an n äquidistanten Stützstellen s_0, \dots, s_n mit Schrittweite σ , wobei $s_0 = 0$ den Anfang und $s_{n+1} = s_E$ das Ende des Pfads darstellt, dann ist der Pfad vollständig durch den Parametervektor $\underline{\eta} = [\eta_1 \dots \eta_n]^T$ und die Startwerte ψ_0 und \underline{c}_0 beschrieben. η_j stellt dabei die Krümmung über dem Intervall $(s_{j-1}, s_j]$ dar, d. h. für $s_{j-1} < s \leq s_j$ gilt $\kappa(s) = \eta_j$.

Die Orientierung und Position an den einzelnen Stützstellen lässt sich dann rekursiv durch

$$\psi_j = \psi(\eta_1, \dots, \eta_j) = \psi_{j-1} + \sigma \cdot \eta_j \quad (4.11)$$

und

$$\underline{c}_j = \underline{c}(\eta_1, \dots, \eta_j) = \underline{c}_{j-1} + \begin{cases} \sigma \cdot \begin{bmatrix} \cos(\psi_j) \\ \sin(\psi_j) \end{bmatrix} & , \text{ falls } \eta_j = 0 \\ \eta_j^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\psi_j) - \sin(\psi_{j-1}) \\ -\cos(\psi_j) + \cos(\psi_{j-1}) \end{bmatrix} & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.12)$$

berechnen. Es ist zu bemerken, dass bei einer solchen Darstellung auf zusammengesetzte Pfade verzichtet werden kann, da plötzliche Drehungen durch eine sehr starke Krümmung eines Pfadsegments dargestellt werden.

Diese Pfaddarstellung wird sowohl für den Benutzer- als auch den Zielpfad verwendet, der durch den Parametervektor $\underline{\eta}_T$ gegeben ist. Verwendet man bei beiden Pfaden die gleichen Stützstellen, lässt sich das Gütekriterium aus Gleichung (4.1) zu

$$J_K(\underline{\eta}) = \sum_{j=1}^n \sigma \cdot (\eta_{jT} - \eta_j)^2 \quad (4.13)$$

umformulieren. Der optimale Benutzerpfad ist dann eindeutig durch den Parametervektor $\underline{\eta}^*$ gegeben, der J_K unter Einhaltung der Nebenbedingungen \underline{g} aus Gleichung (4.9) minimiert.

Transformation des Optimierungsproblems

Eine zuverlässige Optimierung unter den in Abschnitt 4.1.2 gegebenen teilweise sehr komplexen geometrischen Nebenbedingungen ist allerdings nur in Ausnahmefällen möglich. Aus diesem Grund wird das Optimierungsproblem durch Hinzufügen eines weiteren Gütekriteriums in ein Optimierungsproblem ohne Nebenbedingungen transformiert.

Um die Ungleichheitsnebenbedingungen in Form eines Gütekriteriums zu beschreiben, wird auf die Potenzialfeldmethode [61], ein in der Bahnplanung weit verbreitetes Verfahren, zurückgegriffen. Dabei fiel die Wahl auf exponentielle Potenzialfelder, da sich hiermit eine scharfe Abgrenzung zwischen Objekt und zulässiger Umgebung erzielen lässt.

Das zusätzliche Optimierungskriterium J^i für eine Wand i aus der konvexen Hülle oder eines inneren Objekts lässt sich damit an der Stützstelle s_j , ähnlich wie in Gleichung (4.6) als exponentielles Potenzialfeld

$$J^i(\underline{c}_{U,j}) = \exp\left(\alpha(\underline{p}_i - \underline{c}_{U,j})^T \cdot \underline{n}_i\right) \quad (4.14)$$

angeben. Der Bezug zu den Randbedingungen ist leicht herzustellen, da bei großem Wert α $J^i(\underline{c}_U) \approx 0$ für $g_i(\underline{c}_U) < 0$ und $J^i(\underline{c}_U) \gg 1$ für $g_i(\underline{c}_U) > 0$. Die kompletten geometrischen Nebenbedingungen J_N für die Pfadposition $\underline{c}_{U,j}$ lassen sich dann als

$$J_N(\underline{c}_{U,j}) = \sum_m J_C^m(\underline{c}_{U,j}) + \sum_i J_{I_i}(\underline{c}_{U,j}) \quad (4.15)$$

darstellen, wobei sich die J_C^m aus den m Begrenzungsgeraden der konvexen Hülle berechnen. Wie schon zuvor wird bei den Nebenbedingungen, die aus den inneren Objekten resultieren, durch den Minimumsoperator eine konjunktive Verknüpfung realisiert. Die einzelnen J_{I_i} werden dann als

$$J_{I_i}(\underline{c}_{U,j}) = \min\left(J_{I_i}^1(\underline{c}_{U,j}), \dots, J_{I_i}^k(\underline{c}_{U,j})\right) \quad (4.16)$$

durch die k Begrenzungsgeraden der jeweiligen inneren Objekte dargestellt.

Da natürlich die geometrischen Randbedingungen an allen Stützstellen erfüllt sein sollen, ist J_N insgesamt als

$$J_N(\underline{\eta}) = \sum_{j=1}^n J_N(\underline{c}_{U,j}) \quad (4.17)$$

gegeben. Insgesamt ist also die Funktion

$$J(\underline{\eta}) = J_K(\underline{\eta}) + J_N(\underline{\eta}) \quad (4.18)$$

nach dem Parametervektor $\underline{\eta}$ zu minimieren, um $\underline{\eta}^*$ zu finden.

Ein großer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass zusätzliche Optimierungsziele einfach als Ergänzung der Gütefunktion hinzugefügt werden können.

Progressionsansatz

Bei der Optimierung muss sichergestellt werden, dass J in das globale Minimum konvergiert und nicht in eines der zahlreichen lokalen Minima. Hierfür sind zwei wichtige Punkte zu beachten. Zum Einen muss eine gute Startlösung gefunden werden, von der aus das globale Minimum leicht gefunden werden kann. Allerdings ist kein Verfahren bekannt, das eine solche Startlösung für das oben beschriebene Optimierungsproblem liefert. Zum Anderen kann es bei der Optimierung zu numerischen Instabilitäten kommen, vor allem wenn Stützstellen in den Hindernissen bzw. außerhalb der Benutzerumgebung liegen, da in diesem Fall $J_N(\underline{\eta})$ abhängig vom Parameter α und der Eindringtiefe in das Hindernis sehr groß wird.

Beide Probleme, das Finden der Startlösung und die numerischen Instabilitäten, lassen sich durch Verwendung eines Progressionsansatzes, wie er z. B. auch in [39] für die Approximation von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen verwendet wird, lösen. Hierzu wird in J_N ein zusätzlicher Parameter $\lambda \in [0, 1]$, der sogenannte Progressionsparameter, eingeführt. Die einzelnen J^i werden dann zu

$$J^i(\underline{c}_{U,j}, \lambda) = \exp\left(\lambda \cdot \alpha (\underline{p}_i - \underline{c}_{U,j})^T \cdot \underline{n}_i\right) \quad (4.19)$$

angepasst, so dass

$$J_N(\underline{\eta}, 0) = c \quad (4.20)$$

konstant ist und somit keinen Einfluss auf die Optimierung hat. Für $\lambda = 1$ erhält man mit

$$J_N(\underline{\eta}, 1) = J_N(\underline{\eta}) \quad (4.21)$$

das ursprüngliche Optimierungsproblem. Abbildung 4.2 zeigt die Evolution der Randbedingungen von $\lambda = 0$ bis $\lambda = 1$ für eine beispielhafte Umgebung mit zwei inneren Objekten.

Für $\lambda = 0$ haben die Randbedingungen keinen Einfluss auf das Optimierungsergebnis, so dass allein die Gütefunktion J_K aus Gleichung (4.13) minimiert werden muss um eine gute Startlösung zu erhalten. Es ist offensichtlich, dass dieses Minimum mit $\underline{\eta}^* = \underline{\eta}_T$ gefunden wird, d. h. der transformierte Pfad gleicht dem Zielpfad. Von dieser Startlösung ausgehend wird durch kontinuierliches Erhöhen von λ und stetes Nachoptimieren sichergestellt, dass das globale Optimum nicht mehr verlassen wird, bis bei $\lambda = 1$ das globale Optimum²² für das ursprüngliche Optimierungsproblem gefunden wird.

Ein Vorteil des vorgestellten Verfahrens ist, neben der Eigenschaft überhaupt Lösungen zu finden, dadurch gegeben, dass etablierte numerische Optimierer, wie die in MATLAB²³ implementierten Verfahren, eingesetzt werden können.

²² In der Praxis wird natürlich auch hier häufig nur ein lokales Optimum gefunden. In der Regel ist dieses aber besser als Lösungen, die bei der naiven Optimierung des ursprünglichen Problems entstehen.

²³ <http://www.mathworks.de/products/optimization/description3.html>

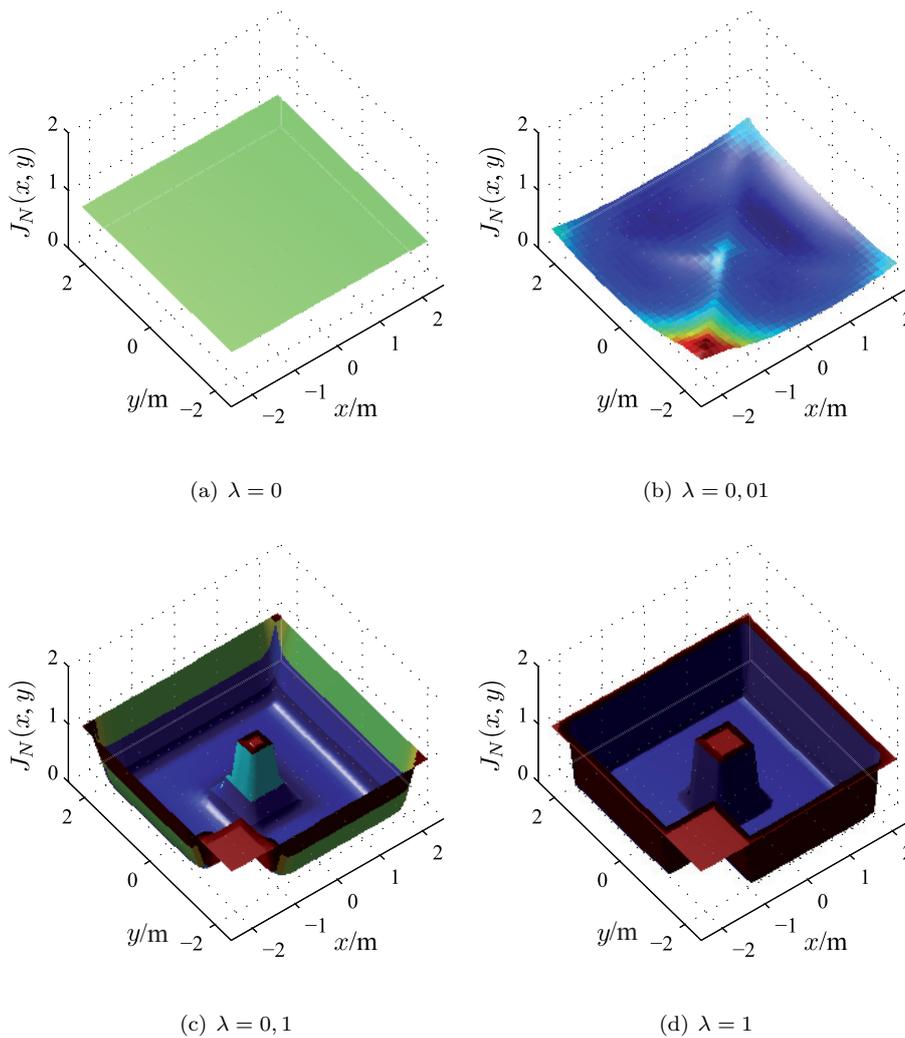
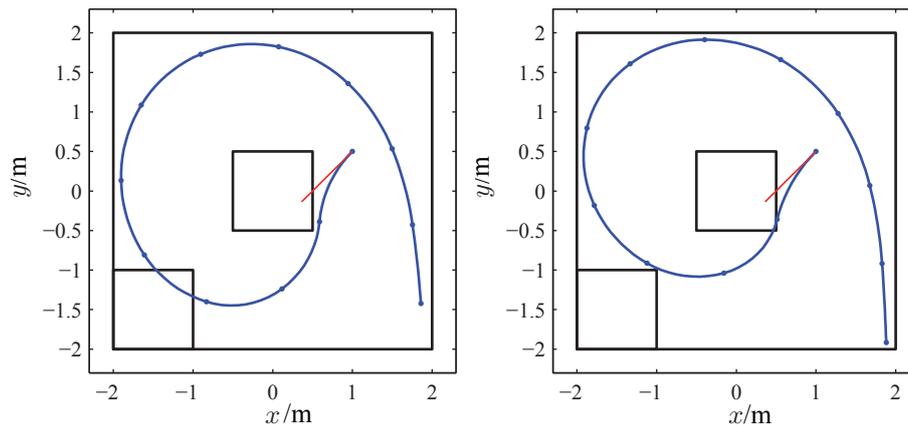


Abbildung 4.2: $J_N(\underline{c}_U, \lambda)$ für $\alpha = 100$ und verschiedene Werte von λ für eine beispielhafte Umgebung, wobei Werte größer als eins der besseren Übersicht willen abgeschnitten wurden.

Analyse des Verfahrens

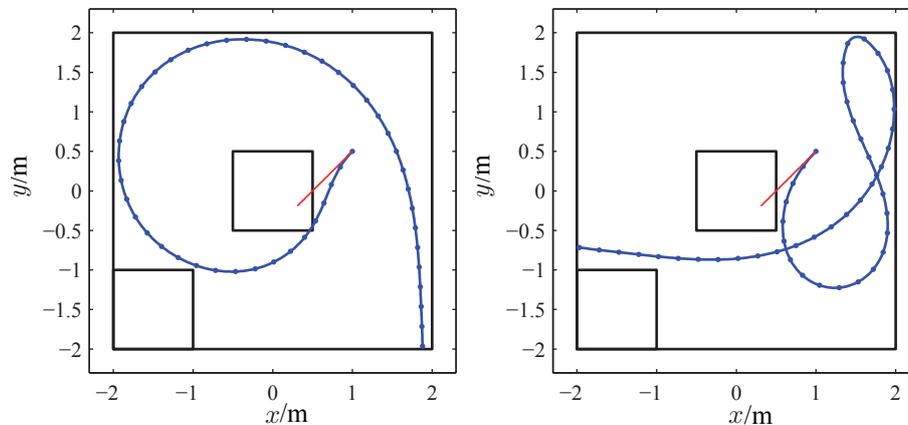
Die Plausibilität des vorgestellten Verfahrens soll im Folgenden anhand von Simulationen untersucht werden. Als Benutzerumgebung wurde eine $2 \times 2 \text{ m}^2$ große Umgebung mit zwei inneren Objekten gewählt, wie sie in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Der Zielpfad wurde als 12 m langer Pfad gewählt und durch 13 im Abstand von 1 m gewählten Stützstellen repräsentiert. Um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten, wurde der Zielpfad als Gerade angenommen. Das bedeutet für den Parametervektor, dass $\underline{\eta}_T = \underline{0}$ gilt.

Abbildung 4.3(a) zeigt den Benutzerpfad gemäß dem oben vorgestellten Verfahren. Es fällt auf, dass der Pfad zwar vollständig innerhalb der konvexen Hülle liegt, aber durch eines der inneren Objekte führt. Das liegt daran, dass die Randbedingungen, die natürlich an jedem Punkt des Pfades gelten müssen, nur an den Stützstellen ausgewertet werden. Ein deutlich verbessertes



(a) Ursprüngliches Optimierungsergebnis mit 13 Stützstellen im Abstand von 1 m.

(b) Wie (a) nach Nachoptimierung.



(c) Wie (b) aber mit 49 Stützstellen im Abstand von 0,25 m

(d) Wie (c), allerdings hat der Zielpfad nach 6 m einen 90°-Knick nach rechts.

Abbildung 4.3: Transformation eines 12 m langen geraden Pfads in der Umgebung aus Abbildung 4.2. Dargestellt sind der transformierte Pfad (blaue Linie), die Stützstellen (blaue Punkte), Anfangspunkt und -orientierung (rote Linie) und die Begrenzungen der Benutzerumgebung (schwarze Linie).

Ergebnis bei vertretbarem zusätzlichem Rechenaufwand lässt sich dadurch erzielen, dass das Ergebnis der progressiven Optimierung noch einmal für $\lambda = 1$ mit einer erhöhten Zahl von Stellen, an denen die Nebenbedingungen ausgewertet werden, nachoptimiert wird. Das Ergebnis eines solchen Schritts ist in Abbildung 4.3(b) zu sehen. Die Nachoptimierung führt dazu, dass der Pfad bei grundsätzlich ähnlichem Verlauf um die Hindernisse herumgeführt wird.

Um einen transformierten Pfad in engeren, stärker verwinkelten Benutzerumgebungen zu finden, kann es eventuell sinnvoll sein, die Zahl der Stützstellen zu erhöhen, da hierdurch die Flexibilität des Pfads deutlich zunimmt. Für die in Abbildung 4.3(c) dargestellte Simulation wurde der Pfad anhand von 49 Stützstellen im Abstand von 0,25 m dargestellt. Bei gewähltem Beispiel ist allerdings die größere Flexibilität des Pfads nur von geringer Bedeutung, so dass das Ergebnis dem aus Abbildung 4.3(b) sehr ähnlich ist.

Nimmt man allerdings den Zielpfad nicht mehr als Gerade an, sondern lässt ihn z. B. wie in Abbildung 4.3(d) nach 6 m um 90° nach rechts abknicken, dann ist die erhöhte Zahl von Stützstellen zum Einen nötig, um den Pfad realistisch darzustellen. Zum Anderen profitiert das Ergebnis deutlich von der höheren Flexibilität des Pfads. Die so gefundene Lösung unterscheidet sich deutlich von den Lösungen für gerade Pfade.

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Verfahren ist allerdings nicht echtzeitfähig, weshalb im folgenden Abschnitt ein heuristisches Verfahren zur Echtzeit-Pfadtransformation in nicht-konvexen Umgebungen vorgestellt wird. Das Ziel dabei ist es, Pfade zu erzeugen, die ähnliche Charakteristika wie die durch Optimierung gewonnenen Pfade aufweisen. Betrachtet man die in Abbildung 4.3 gezeigten Pfade, lässt sich das spezifische Verhalten bezüglich der Randbedingungen in drei Aussagen fassen: Der transformierte Pfad kann eine Wand aus der konvexen Hülle berühren, eine Wand eines inneren Objekts berühren oder durch eine Ecke eines inneren Objekts führen.

4.1.4 Echtzeit-Transformation in nicht-konvexen Umgebungen

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, einen echtzeitfähigen heuristischen Algorithmus für die Pfadtransformation in nicht-konvexen Benutzerumgebungen zu finden, der in Verbindung mit dynamischer Bewegungskompression eingesetzt werden kann. Dabei sollen Lösungen gefunden werden, die ähnliche Eigenschaften haben, wie die Ergebnisse der numerischen Optimierung aus Abschnitt 4.1.3. Das im Folgenden vorgestellte Verfahren ist eine Erweiterung des Halbkreisalgorithmus für konvexe Umgebungen aus [68] und wurde in einer ersten Version in [127] vorgestellt. Allerdings unterscheidet sich die Darstellung teilweise erheblich von diesen Arbeiten, da die hier verwendete Form eine einheitliche Behandlung von konvexen und nicht-konvexen Umgebungen erlaubt.

Vereinfachtes Optimierungsproblem

Um einen echtzeitfähigen Algorithmus zu erhalten, wird das Optimierungsproblem aus Abschnitt 4.1.1 noch weiter vereinfacht. Hierzu werden zwei zusätzliche Annahmen gemacht. Zum Einen wird angenommen, dass der Benutzer noch weit vom Endpunkt des Pfads entfernt ist, so dass spezielle Betrachtungen für das Ende des Pfads ausgeschlossen sind. Zum Anderen wird, und hierbei handelt es sich um die wichtigste zusätzliche Voraussetzung, der Zielpfad immer als eine Gerade beginnend am Planungsbezugspunkt angenommen. Für die Krümmungsfunktion κ_T des Zielpfads bedeutet das, dass

$$\kappa_T(s) = 0 \tag{4.22}$$

konstant ist.

Setzt man dieses κ_T in die Gütefunktion J aus Gleichung (4.1) ein, erhält man eine stark vereinfachte neue Gütefunktion

$$J = \int_0^{s_E} (\kappa_U(s))^2 ds . \quad (4.23)$$

Für diese vereinfachte Funktion lässt sich nach [76] zeigen, dass ein Minimum von J für konstantes κ_U erreicht wird. Da außerdem noch die Randbedingungen aus Gleichung (4.9) erfüllt sein müssen, ist der transformierte Pfad durch den größten Kreisbogen gegeben, der die Randbedingungen nicht verletzt und am Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}_U$ mit zugehöriger Orientierung ψ_U beginnt.

Ein solcher Pfad ist natürlich nur für ein kurzes Stück optimal. Außerdem sollen auch hier beliebige Pfade erlaubt sein. Aus diesen Gründen wird der Gesamtpfad des Benutzers inkrementell transformiert. Das bedeutet, dass in jedem Zeitpunkt der Zielpfad als gerade Linie vorhergesagt und entsprechend als Kreisbogen transformiert wird. Auf diese Weise werden beliebige Pfade als zusammengesetzte Pfade aus Geraden (in der Zielumgebung) bzw. Kreisbögen (in der Benutzerumgebung) dargestellt.

γ -Bogen-Pfadsegmente

Anders als beim numerischen Verfahren wird beim inkrementellen Verfahren als momentane Transformation kein Kreisbogensegment mit vorgegebener Bogenlänge gesucht. Vielmehr wird ein Bogen bestimmt, der einen festgelegten Winkel γ umspannt. Solche Bögen lassen sich mit Hilfe geometrischer Berechnungen einfach bestimmen. Diese Bögen werden, wenn sie im Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}_U$ beginnen und ihre Tangente in $\underline{\rho}_U$ der Startorientierung ψ_U entspricht, im Folgenden als γ -Bögen bezeichnet.

Der Parameter $\gamma \in (0, 2\pi]$ erlaubt dabei ein Abwägen zwischen Gierigkeit des Algorithmus und Vorausschau bzw. Konservativität. Abbildung 4.4 vergleicht die größten Kreisbögen für verschiedene Werte von γ bei sonst gleichen Bedingungen. Bei einem Wert von $\gamma = \pi$ und konvexen Randbedingungen entspricht das Ergebnis dem Halbkreisverfahren aus [68]. Größere

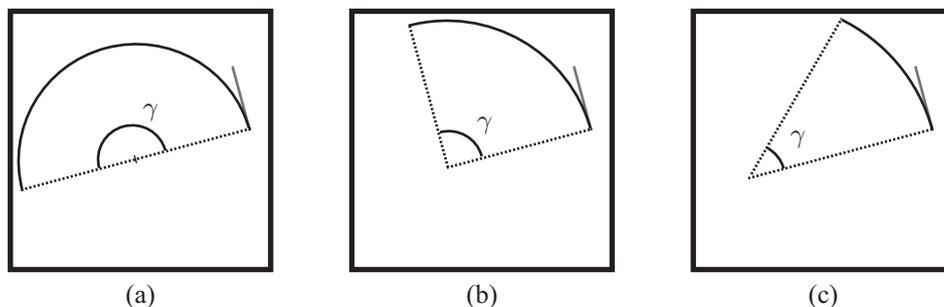


Abbildung 4.4: Größter γ -Bogen bei gleicher Startposition für verschiedene Werte von γ . (a) $\gamma = \pi$, (b) $\gamma = \frac{\pi}{2}$, (c) $\gamma = \frac{\pi}{4}$. Der Radius des Kreisbogens nimmt mit kleiner werdendem γ zu, d. h. die Krümmung nimmt ab.

Werte von γ sind nicht praktikabel, da sie zu überkonservativen Bahnen und damit zu starker Krümmung führen. So würde auch ein Hindernis, das hinter dem Benutzer liegt, zu einer starken Krümmung des Pfads führen. Kleine Werte von γ führen zu geringen Krümmungen des transformierten Pfads, so lange sich der Benutzer keiner Begrenzung nähert. In der Nähe der Begrenzung nehmen die Krümmungen stark zu, was der Immersion des Benutzers in erheblichem Maße abträglich sein kann. Das Verfahren, das in [100] beschrieben wurde, entspricht im Wesentlichen dem γ -Bogen-Algorithmus mit $\gamma \rightarrow 0$. In der Praxis haben sich Werte zwischen $\gamma = \pi$ bei konvexen Umgebungen und $\gamma = \frac{\pi}{2}$ bei nicht-konvexen Umgebungen bewährt.

Inkrementelle Pfadtransformation in nicht-konvexen Umgebungen

Anhand der in Abschnitt 4.1.3 gefundenen Charakteristika eines optimalen Pfads lassen sich mit Hilfe geometrischer Berechnung, wie in Abbildung 4.5 gezeigt, leicht alle γ -Bögen finden, die mindestens eine der drei Bedingungen, Berühren einer Wand der konvexen Hülle, Berühren einer Wand eines inneren Objekts oder Berühren einer Ecke eines inneren Objekts, erfüllen.

Basierend auf dieser Berechnung wird gemäß dem Vorgehen bei dynamischer Bewegungskompression in jedem Zeitschritt nach dem unten beschriebenen Verfahren beginnend am aktuellen Planungsbezugspunkt ρ_U der größte gültige γ -Bogen, also der größte γ -Bogen, der keine der Randbedingungen verletzt, bestimmt. Dadurch lassen sich auch beliebige zusammengesetzte Pfade transformieren. Dabei ist zu beachten, dass die γ -Bögen sowohl für Links- als auch für Rechtsbögen berechnet werden müssen. Aus den gefundenen Links- und Rechts- γ -Bögen wird schließlich der mit dem größeren Radius gewählt. Da sich das Vestibularorgan an eine Abweichungsrichtung gewöhnt, wird häufig eine einmal eingeschlagene Richtung bevorzugt, so dass für einen Richtungswechsel ein γ -Bogen gefunden werden muss, dessen Radius um einen Faktor größer sein muss, der üblicherweise zwischen 1 und 2 liegt, als der des γ -Bogens für die bisherige Richtung.

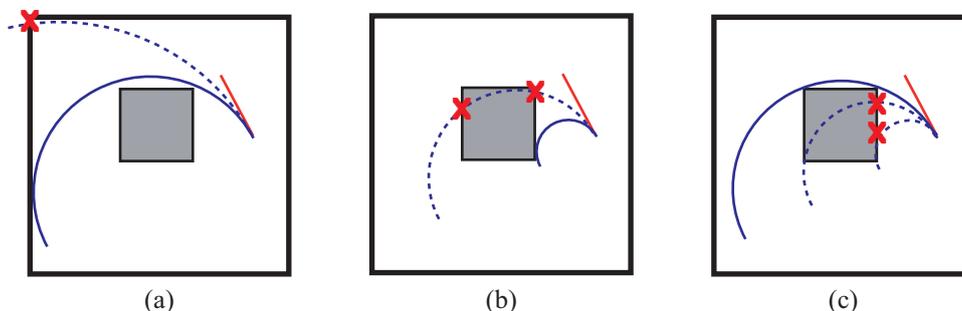


Abbildung 4.5: Alle vom γ -Bogen-Algorithmus gefundenen Links-Bögen für $\gamma = \pi$. Ungültige entfernte Bögen sind mit gestrichelter Linie dargestellt. (a) Bögen berühren eine Außenwand. (b) Bögen berühren eine Innenwand. (c) Bögen führen durch eine Ecke.

Algorithmus 1 γ -Bogen-Algorithmus für nicht-konvexe Umgebungen.

```

Walls  $\mathbf{C} \leftarrow \{C_1, \dots, C_n\}$  ▷ konvexe Hülle
Walls  $\mathbf{I} \leftarrow \{I_1, \dots, I_m\}$  ▷ innere Begrenzungen
Walls  $\mathbf{X} \leftarrow \mathbf{C} \cup \mathbf{I}$  ▷ sämtliche Wände
Corners  $\mathbf{K} \leftarrow \{K_1, \dots, K_k\}$  ▷ Ecken der inneren Objekte
Arcs  $\mathbf{G} \leftarrow \{\}$  ▷ leere Liste mit Bögen

for all  $C_i \in \mathbf{C}$  do
   $\mathbf{G} \leftarrow \mathbf{G} \cup \{\text{GAMMA\_ARC}(C_i)\}$  ▷ Bögen, die Außenwände berühren
end for
for all  $I_i \in \mathbf{I}$  do
   $\mathbf{G} \leftarrow \mathbf{G} \cup \{\text{GAMMA\_ARC}(I_i)\}$  ▷ Bögen, die Innenwände berühren
end for
for all  $K_i \in \mathbf{K}$  do
   $\mathbf{G} \leftarrow \mathbf{G} \cup \{\text{GAMMA\_ARC}(K_i)\}$  ▷ Bögen, die innere Ecken berühren
end for
for all  $G_i \in \mathbf{G}$  do
  for all  $X_j \in \mathbf{X}$  do
    if  $\text{INTERSECTS}(G_i, X_j)$  then
       $\mathbf{G} \leftarrow \mathbf{G} \setminus \{G_i\}$  ▷ Entfernen ungültiger Bögen
    end if
  end for
end for
return  $\text{GET\_LARGEST}(\mathbf{G})$  ▷ Auswahl des größten Bogens

```

Die Berechnung der gültigen γ -Bögen erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird zunächst nur die konvexe Hülle der Benutzerumgebung C betrachtet. Dafür werden sämtliche γ -Bögen berechnet, die eine der Außenwände berühren. Um zu gewährleisten, dass diese Bögen zulässige Pfade sind, muss für jeden Bogen überprüft werden, ob er eine der äußeren oder inneren Wände schneidet, was sich auf den Schnitt von Kreis und Gerade zurückführen lässt. Aus der Menge der gefundenen Bögen werden alle ungültigen Bögen entfernt. Der verbleibende Bogen mit dem größten Radius ist trivialerweise die gesuchte Lösung.

Falls im ersten Schritt keine gültigen γ -Bögen gefunden werden, werden im zweiten Schritt alle γ -Bögen, die durch einen Eckpunkt eines inneren Objekts führen, und alle γ -Bögen, die eine Innenwand berühren, berechnet. Auch hier wird wie im ersten Schritt die Gültigkeit der Bögen überprüft, und alle ungültigen Bögen werden entfernt. Aus den verbleibenden Bögen wird der Bogen mit dem größten Radius ausgewählt. Ein solcher Bogen ist stets existent und erfüllt alle Randbedingungen.

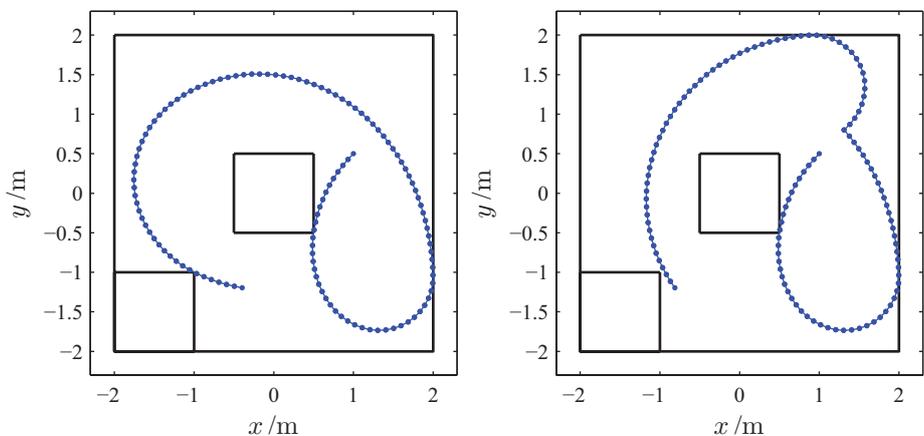
Algorithmus 1 zeigt den zuvor beschriebenen γ -Bogen-Algorithmus für nicht-konvexe Benutzerumgebung noch einmal in einer etwas kompakteren Darstellung. Hier werden jedoch zunächst

alle γ -Bögen erzeugt, bevor die ungültigen Bögen entfernt werden. Der Aufwand des resultierenden Algorithmus wächst zwar quadratisch mit der Anzahl der Wände in der Benutzerumgebungen, dies stellt allerdings kein Hindernis bezüglich der Echtzeitanwendung dar, da die Anzahl der Wände üblicherweise klein ist und die einzelnen Berechnungen nicht besonders aufwändig sind.

Abbildung 4.6 zeigt das Ergebnis der inkrementellen Pfadtransformation am selben Beispiel wie in Abbildung 4.3. Der 12 m lange Pfad wurde hierbei mit einer Schrittweite von 0,1 m neu berechnet, was bei einer Gehgeschwindigkeit von $1 \frac{m}{s}$ einer Tracker-Update rate von $10 \frac{1}{s}$ entspricht.

Der in Abbildung 4.6(a) dargestellte Pfad entspricht dabei einem geraden Pfad in der Zielumgebung. Obwohl sich der Pfad von den in Abbildung 4.3(b) und (c) dargestellten Pfaden unterscheidet, ist doch zu erkennen, dass er ähnliche Charakteristika aufweist. Auch ein Abknicken des Pfads ist, wie in Abbildung 4.6(b) dargestellt, möglich. Hierbei fällt auf, dass sich der Pfad bis zum Abknicken nicht vom vorherigen Beispiel unterscheidet. Dies entspricht den Erwartungen, da der Pfad den Annahmen des inkrementellen Algorithmus entsprechend stets als Gerade prädiiziert wurde.

Insgesamt bietet das inkrementelle Verfahren eine zwar suboptimale, aber für den praktischen Einsatz bestens geeignete Echtzeit-Pfadtransformation in nicht-konvexen Umgebungen.



(a) Transformation eines geraden Pfads. (b) Der Pfad macht nach 6 m einen 90°-Knick nach rechts.

Abbildung 4.6: Inkrementelle Pfadtransformation in derselben Umgebung und mit den gleichen Startbedingungen wie in Abbildung 4.3. Dabei wurde eine Schrittweite von 0,1 m und $\gamma = \frac{\pi}{2}$ gewählt.

4.2 Stochastische Zielerkennung und Pfadprädiktion

Ein in der Literatur bisher wenig beachtetes Problem ist die Prädiktion eines Pfads, den ein Benutzer beabsichtigt zurückzulegen. Grundsätzlich besteht dieses Problem aus zwei Teilen.

Im ersten Schritt muss z. B. mit Mitteln der Intentionserkennung das Ziel des Benutzers bzw. ein maßgeblicher Wegpunkt erkannt werden. Im zweiten Schritt wird dann basierend auf einem Modell des Benutzers der Pfad zu diesem Ziel prädiziert.

Es gibt Ansätze [12], die versuchen, für Simulationen realistisch aussehende Pfade zu generieren. Diese Pfade sind aber für die Bewegungskompression nicht zu gebrauchen, da sie nicht in analytischer Form vorliegen.

Es gibt mehrere Gründe, die dafür sprechen, Pfade stets als Geraden zu prädizieren. Zum Einen entspricht das dem menschlichen Verhalten bei zielgerichteter Bewegung, wie es in Abschnitt 1.1.2 beschrieben wurde. Zum Anderen benötigt die inkrementelle Echtzeit-Pfadtransformation gerade Zielpfade. Um also den Einsatz in einem realen System zu ermöglichen, ist diese Form der Pfade schon aus Gründen der Kompatibilität mit dem in Abschnitt 4.1.4 vorgestellten Verfahren zwingend notwendig.

Im Folgenden werden Zielpfade also immer als Geraden vom Planungsbezugspunkt ρ_T zu einem Zielobjekt angenommen. Damit lässt sich die Pfadprädiktion auf eine Zielerkennung reduzieren. Dieser Zielerkennung stehen als Informationsquellen die Lage des Proxys in der Zielumgebung und gegebenenfalls zusätzliche Informationen über die Zielumgebung zur Verfügung.

Ein Verfahren, das ohne Information über die Zielumgebung auskommt und damit auch für unbekannte Umgebungen geeignet ist, wurde bereits in [76] vorgestellt. Bei diesem heuristischen Ansatz wird angenommen, dass das Ziel stets weit entfernt vom Benutzer, z. B. 35 m, in dessen Blickrichtung liegt.

4.2.1 Zielerkennung für bekannte Umgebungen

Das hier vorgestellte intentionsbasierte Verfahren ist speziell für bekannte Umgebungen geeignet, da es mögliche Zielobjekte aus der Zielumgebung zur Zielerkennung verwendet. Hierfür soll ein stochastischer Schätzer hergeleitet werden, der basierend auf der kontinuierlichen bekannten Proxylage eine Wahrscheinlichkeitsdichte berechnet, die für jeden bekannten Wegpunkt angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit er das momentane Zielobjekt des Benutzers ist. Die Auswahl des für die Pfadprädiktion verwendeten Zielobjekts erfolgt dann mittels Maximum-a-posteriori-Schätzung basierend auf dieser Dichte.

Üblicherweise sind die möglichen Wegpunkte a priori bekannt. Alternativ können sie während der Exploration der Zielumgebung mit Verfahren, wie sie in [119] beschrieben wurden, erkannt und für die spätere Verwendung kartografiert werden. In einem realistischen Anwendungsszenario gehören zu diesen Zielobjekten einerseits wichtige Wegpunkte, wie z. B. Türdurchgänge oder Abzweigungen, aber auch solche Orte, die durch ihre Funktion, z. B. der Kühlschrank, oder durch ihren optischen Reiz, z. B. Bilder, zu Zielen werden. Die Erkennung des aktuellen Ziels des Benutzers basiert dann auf den beobachtbaren Größen in der Zielumgebung, wie der Position und der Orientierung des Proxys. Diese Größen erhält man aus der Roboterselbstlokalisierung oder, bei virtuellen Umgebungen, direkt über Abfrage der Avatarposition.

In formaler Darstellung bedeutet das, dass basierend auf der kontinuierlichen Messung der Kopf- lage des Proxys \hat{y} auf sein Zielobjekt $x \in X$ aus der diskreten Menge $X = \{1, \dots, n\}$ der mögli- chen Zielobjekte geschlossen werden muss. Hierzu wird ein hybrider Bayes'scher Schätzer [130] verwendet, der im Folgenden näher erläutert wird.

4.2.2 Bayes'scher Schätzer

In diesem Abschnitt wird der hybride Bayes'sche Schätzer zur intentionsbasierten Zielerkennung hergeleitet. Dabei werden kurz die zugrundeliegenden generischen Filterformeln vorgestellt. Eine ausführliche Einführung in das Gebiet der stochastischen Filterverfahren würde allerdings den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Hierfür sei auf die einschlägige Literatur, z. B. [40], verwiesen.

Ein zeitdiskreter Bayes'scher Schätzer, wie er in Abbildung 4.7 dargestellt ist, besteht aus zwei Schritten: Filterschritt und Prädiktionsschritt. Im Filterschritt wird die posteriore Dichte f^e für den Zustand des Systems, also das Ziel x des Benutzers, basierend auf einer Messung der Lage des Proxys \hat{y} als

$$f_k^e(x) = c_k f(\hat{y}|x) f_k^p(x) \quad (4.24)$$

berechnet. Dabei ist f^p die priore Dichte für den Zustand und c_k eine Normalisierungskonstante. Die bedingte Dichte $f_k(y|x)$ repräsentiert dabei das stochastische Messmodell, also die erwartete Messung für y bei gegebenem x . Durch Einsetzen einer tatsächlichen Messung \hat{y} erhält man daraus die sogenannte *Likelihood* für x .

Im Prädiktionsschritt wird die priore Dichte zum Zeitpunkt $k + 1$ durch die posteriore Dichte aus dem vorherigen Zeitschritt durch

$$f_{k+1}^p(x_{k+1}) = \int f(x_{k+1}|x_k) f_k^e(x_k) dx_k \quad (4.25)$$

gegeben, wobei $f(x_{k+1}|x_k)$ das stochastische Systemmodell darstellt. Es beschreibt, wie sich der Zustand des Systems über die Zeit verändert.

Filter- und Prädiktionsschritt werden jetzt für das spezielle Problem hergeleitet.

Filterschritt

Das Ziel des Benutzers ist eine diskrete Variable $x \in \{1, \dots, n\}$, und $P(x = i)$ gibt die Wahr- scheinlichkeit an, dass $x = i$, also dass das aktuelle Ziel des Benutzers das Ziel mit der Nummer i ist. Damit lässt sich die diskrete Dichte für das Ziel des Benutzers als Dirac-Mischdichte in der Form

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \delta(x - j) P(x = j) \quad (4.26)$$

angeben.

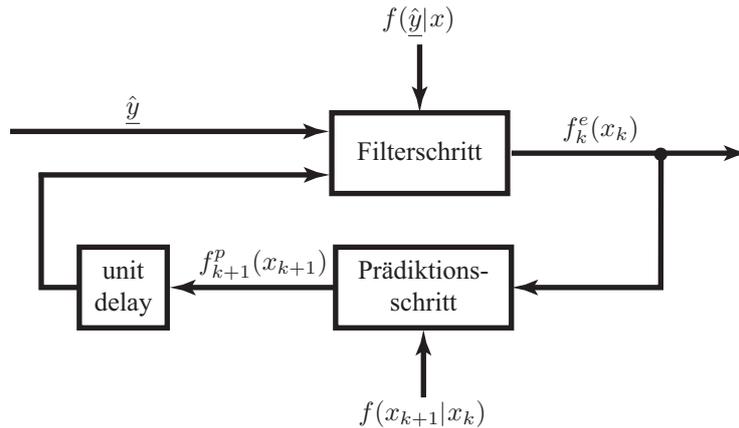


Abbildung 4.7: Struktur des Filters zur Zielerkennung.

Da die bedingte Dichte $f(\underline{y}|x)$ die Dichte einer kontinuierlichen Variablen \underline{y} gegeben eine diskrete Variable x beschreibt ist sie eine hybride bedingte Dichte. Unter der Annahme, dass die bedingte Dichte zeitinvariant ist, lässt sie sich in der Form

$$\begin{aligned} f(\underline{y}|x) &= \sum_{j=1}^n \delta(x - j) f(\underline{y}|x = j) \\ &=: \sum_{j=1}^n \delta(x - j) f^{(j)}(\underline{y}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

angeben. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen $f^{(j)}(\underline{y})$ keine bedingten Dichten, sondern einfache kontinuierliche Dichten über \underline{y} sind. Die hybride bedingte Dichte lässt sich also als eine Bank von Dichten darstellen, aus denen abhängig vom Zustand von x eine ausgewählt wird.

Um den Filterschritt für den diskreten Filter zu erhalten, setzt man die diskrete Dichte aus (4.26) und die hybride bedingte Dichte aus (4.27) in Gleichung (4.24) ein. Man erhält den Filterschritt in der Form

$$\sum_{j=1}^n \delta(x - j) P_k^e(x_k = j) = c_k \sum_{l=1}^n \delta(x - l) f^{(l)}(\underline{y}) \sum_{m=1}^n \delta(x - m) P_k^p(x_k = m) . \quad (4.28)$$

Wegen der Ausblendeigenschaft der Dirac'schen δ -Funktion kann die posteriore Wahrscheinlichkeit P^e für jedes Ziel unabhängig von den anderen Zielen als

$$P_k^e(x_k = i) = c_k \cdot f^{(i)}(\underline{y}) \cdot P_k^p(x_k = i) \quad (4.29)$$

angegeben werden.

Prädiktionsschritt

Durch Einsetzen der diskreten Dichte (4.26) in den Prädiktionsschritt (4.25) erhält man folgende Darstellung

$$\sum_{j=1}^n \delta(x_{k+1} - j) P^p(x_{k+1} = j) = \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \delta(x_{k+1} - l) \delta(x_k - m) P(x_{k+1} = l | x_k = m) \cdot \sum_{i=1}^n \delta(x_k - i) P^e(x_k = i) . \quad (4.30)$$

Dies ist der wohlbekannte diskrete Prädiktionsschritt, der sich unter Verwendung des Vektors

$$\underline{P}(x) = \begin{bmatrix} P(x = 1) \\ \vdots \\ P(x = n) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

als Vektor-Matrix-Multiplikation

$$\underline{P}_{k+1}^p(x_{k+1}) = \mathbf{A} \underline{P}_k^e(x_k) \quad (4.32)$$

darstellen lässt. Dabei stellen die Elemente $\alpha_{i,j}$ der Matrix \mathbf{A} die Übergangswahrscheinlichkeiten

$$\alpha_{i,j} = P(x_{k+1} = i | x_k = j) \quad (4.33)$$

von Ziel i zu Ziel j dar. \mathbf{A} wird häufig auch als Zustandsübergangsmatrix bezeichnet.

4.2.3 Modellbildung

Messmodell

Das stochastische Messmodell $f(\underline{y}|x)$ gibt die erwartete Messung bei gegebenem Zielobjekt wieder. Als Messung werden aus den beobachteten Daten extrahierte Merkmale verwendet. Diese sind z. B. Position des Proxys, Blickrichtung und Laufrichtung, wobei sich letztere in Form des Differenzenquotienten als diskrete Ableitung der Position berechnen lässt.

Die bedingte Dichte ist zunächst unbekannt und soll aus annotierten Trainingsdaten geschätzt werden. Hierzu wird eine parametrische Darstellung gefunden, die auf Gaußmischfunktionen basiert.

Wie bereits oben gezeigt, kann die komplette bedingte Dichte $f(\underline{y}|x)$ durch ihre einzelnen Komponenten $f^{(j)}(\underline{y})$ dargestellt werden. Es müssen also nur noch diese einzelnen Komponenten durch jeweils eine Gaußmischdichte als

$$f^{(j)}(\underline{y}) = \sum_{i=1}^L w_i \mathcal{N}(\underline{y} - \underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i) \quad (4.34)$$

approximiert werden. Dabei ist L die als fest angenommene Anzahl der Komponenten. Die Gewichte w_i , die Mittelpunkte der einzelnen Gaußglocken $\underline{\mu}_i$ und ihre Kovarianzmatrizen \mathbf{C}_i müssen mit den in [114] beschriebenen Verfahren aus den Trainingsdaten identifiziert werden.

Würde man jedoch, wie oben beschrieben, für jedes mögliche Ziel j eine eigene Dichte $f^{(j)}(\underline{y})$ trainieren, bräuchte man eine große Menge von Trainingsdaten, die in der realen Anwendung aber nicht vorliegt. Außerdem würde jede Änderung der Zielumgebung, z. B. durch Hinzufügen neuer Ziele oder Veränderung bekannter Ziele, dazu führen, dass zumindest für die betroffenen Ziele neue Trainingsdaten gesammelt und die Dichten neu approximiert werden müssen. Ein solches Vorgehen ist natürlich unpraktikabel, weshalb ein Modell gefunden werden muss, das von den einzelnen Zielen unabhängig ist.

Da die zielgerichtete Fortbewegung weitestgehend unabhängig vom gerade angesteuerten Zielobjekt ist, lassen sich statt der absoluten Merkmale relative, um die Position des Zielobjekts bereinigte, Merkmale verwenden. Aus den Messungen und der Position des Zielobjekts wird dann ein neuer Merkmalsvektor

$$\tilde{\underline{y}} = g(\underline{y}, x) \tag{4.35}$$

berechnet. Zu diesen relativen Merkmalen gehören der Abstand zum Ziel, die relative Blickrichtung und die relative Laufrichtung wie sie in Abbildung 4.8 dargestellt sind.

Mit diesen relativen Merkmalen lässt sich durch

$$f^{(j)}(\tilde{\underline{y}}) = f(\tilde{\underline{y}}) \tag{4.36}$$

ein Modell angeben, das für jedes Ziel $x = j$ identisch ist. Somit stehen für die Parametrierung deutlich mehr Daten zur Verfügung als bei unterschiedlichen Modellen. Durch diesen Kunstgriff ist das Modell jetzt zielunabhängig, dafür fließen die Zielobjekte in die Messung $\tilde{\underline{y}}$ ein, wodurch die Dimensionalität der Messung um den Faktor n entsprechend der Anzahl der Zielobjekte erhöht wird.

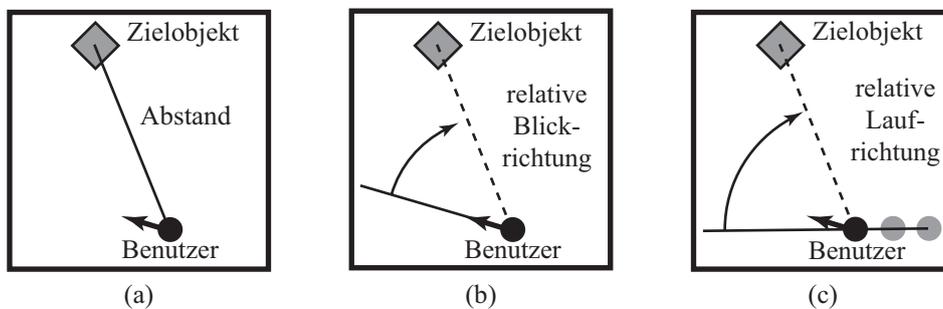


Abbildung 4.8: Die bei der Zielerkennung verwendeten relativen Merkmale. (a) Abstand zum Ziel. (b) Die relative Blickrichtung entspricht dem wahrgenommenen Fehlwinkel. (c) Relative Bewegungsrichtung.

Systemmodell

Für die Parametrierung des Systemmodells müssen die Einträge in die Zustandsübergangsmatrix \mathbf{A} so gewählt werden, dass sie das menschliche Verhalten angemessen repräsentiert. Hierzu wurde angenommen, dass ein menschlicher Benutzer, der sich auf ein Ziel zubewegt über längere Zeit an diesem Ziel festhält. Das wird dadurch modelliert, dass der Zustand mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p beibehalten wird, also $P(x_{k+1} = i | x_k = i) = p$. Allerdings besteht zu jedem Zeitpunkt auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit $1 - p$, dass der Benutzer sich neu orientiert und ein neues Ziel sucht. In diesem Fall sind aber sämtliche Zielobjekte gleich wahrscheinlich. Dementsprechend ergibt sich für die Einträge $\alpha_{i,j}$ der Matrix \mathbf{A}

$$\alpha_{i,i} = p$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{1 - p}{n - 1} \quad , \quad (4.37)$$

wobei n die Anzahl der möglichen Zielobjekte ist. In der Anwendung hat sich dabei ein Wert von $p = 0,5$ als geeignet erwiesen.

4.2.4 Zielauswahl

Um zu garantieren, dass das Ergebnis der Pfadprädiktion immer ein zulässiger Pfad ist, d. h. dass er keine Wände kreuzt, muss gewährleistet werden, dass das mit dem oben beschriebenen Verfahren ausgewählte Ziel in einer geraden Linie erreichbar ist. Hierzu wird ein Zweistufenverfahren, wie es in Abbildung 4.9 dargestellt ist, eingeführt.

Im ersten Schritt werden aus der Menge der möglichen Zielobjekte alle diejenigen Objekte ausgewählt, die von der Proxyposition aus sichtbar und damit in einer geraden Linie erreichbar sind. Diese werden auch als *aktive Ziele* bezeichnet.

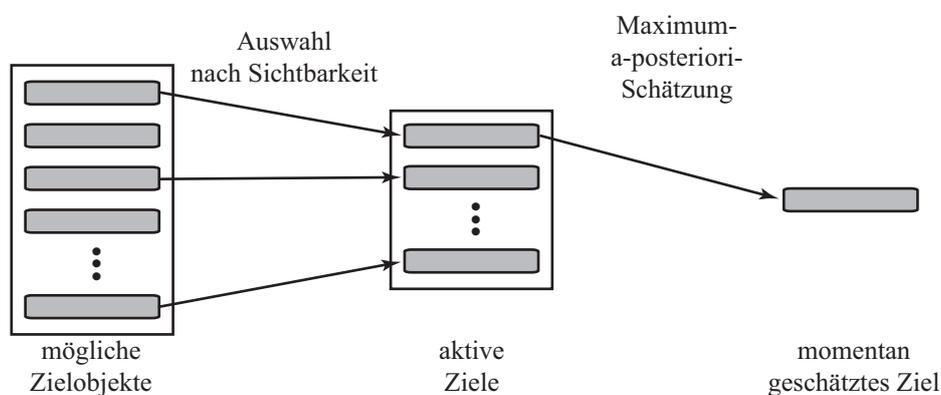


Abbildung 4.9: Das aktuelle Ziel wird in einem zweistufigen Verfahren aus allen zur Verfügung stehenden Zielobjekten ausgewählt.

Erst im zweiten Schritt wird mit dem oben beschriebenen Verfahren die diskrete posteriore Dichte $f^e(x)$ berechnet. Das momentane Ziel wird durch Maximum-a-posteriori-Schätzung als

$$\hat{x} = \arg \max_{x \in \{1, \dots, n\}} P^e(x) \quad (4.38)$$

bestimmt.

4.3 Geregelte Benutzerführung

Die Benutzerführung, wie sie in Abschnitt 3.3.2 erläutert wurde, setzt implizit das pfadgerichtete Fortbewegungsmodell aus Abschnitt 1.1.2 voraus. Diesem Modell entsprechend ist der Benutzer stets darum bemüht, den Abstand zum Zielpfad, also die n -Koordinate des krummlinigen Pfadkoordinatensystems \tilde{S} zu minimieren. Da sich Benutzer- und Proxylage in Pfadkoordinaten entsprechen, wird also auch der Abstand zum Benutzerpfad minimiert und der Benutzer so auf dem transformierten Pfad geführt.

Den Ausführungen in Abschnitt 1.1.2 entsprechend gilt dieses Fortbewegungsmodell nur in Ausnahmefällen und stellt quasi den idealisierten Benutzer dar. Ein realistischeres Fortbewegungsmodell ist durch die zielgerichtete Fortbewegung gegeben, bei der der Abstand zum Pfad nicht in die Bewegungssteuerung einfließt. Im Folgenden wird zunächst das hierdurch auftretende Abweichen vom Pfad erläutert. Anschließend wird das Modell der zielgerichteten Fortbewegung detailliert ausgearbeitet. Darauf basierend wird die Benutzerführung um eine fehlerkorrigierende Komponente zur geregelten Benutzerführung [117, 129] erweitert.

4.3.1 Abweichen des Benutzers vom Pfad

Ein Phänomen, das sich besonders gut bei statischer Bewegungskompression beobachten lässt, also wenn der Zielpfad zu Beginn der telepräsenten Bewegung vorhergesagt und komprimiert wurde, ist das Abweichen von Benutzer und Proxy vom Benutzer- bzw. Zielpfad. Da der Benutzer üblicherweise nach außen vom Benutzerpfad abweicht, besteht die Gefahr, dass er die Benutzerumgebung verlässt und schlimmsten Falls mit ihrer Begrenzung kollidiert.

Dieses Problem lässt sich darauf zurückführen, dass die Benutzerführung wie eine Steuerung auf den Benutzer wirkt. Abbildung 4.10(a) und (b) verdeutlichen das Vorgehen bei der Standardbenutzerführung. Während sich der Benutzer in Richtung des Ziels in der Zielumgebung bewegt, wird die Transformation zwischen den beiden Umgebungen so verändert, dass der Benutzer das Ziel leicht seitlich von sich wahrnimmt. Durch die Dynamik und leichte Zeitverzögerungen des Benutzers dreht er sich, wie es in Abbildung 4.10(c) dargestellt ist, nicht vollständig in Richtung des Ziels. Hierdurch entsteht bei der weiteren Fortbewegung ein Abweichen vom Pfad, auf das der Benutzer bei zielgerichteter Fortbewegung nicht reagiert, da es von ihm nicht wahrgenommen wird.

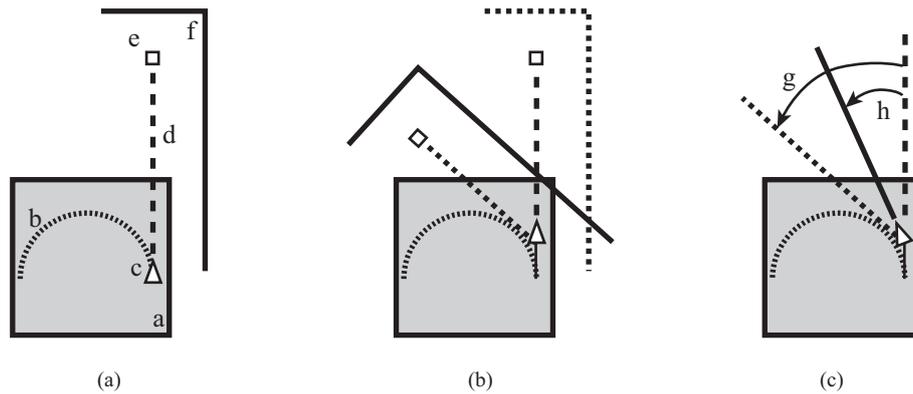


Abbildung 4.10: Abweichen des Benutzers vom Sollpfad bei Standardbenutzerführung. Dargestellt sind Benutzerumgebung a, Benutzerpfad b, Benutzer-/Proxyposition c, Zielpfad d, Zielobjekt e, Zielumgebung f, wahrgenommener Winkelfehler zum Ziel g und die tatsächliche Richtungskorrektur h.

Umgehung des Problems bei der Standardbenutzerführung

Bei dynamischer Bewegungskompression kann vermieden werden, dass der Benutzer die Benutzerumgebung verlässt, indem das Problem in die Module Pfadprädiktion und Pfadtransformation verlagert wird. Hierzu wird zu jedem Zeitpunkt der Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}$ in beiden Umgebungen mit der Benutzer- bzw. Proxyposition gleichgesetzt. Von diesem Punkt aus wird in jedem Zeitschritt der Pfad neu vorhergesagt und transformiert. Auf die Abweichungen vom ursprünglich vorhergesagten Zielpfad wird aufgrund des geänderten Abstands zu den Begrenzungen der Umgebung mit einer anderen Krümmung des Benutzerpfads, üblicherweise einer stärkeren Krümmung, reagiert.

Die Nachteile dieses Verfahrens aus [68, 76] sind offensichtlich. Es verhindert die Verwendung statisch vorhergesagter und transformierter Pfade und somit auch die Verwendung global optimaler Pfade. Außerdem werden nur die Abweichungen in der Benutzerumgebung, nicht aber die Abweichungen in der Zielumgebung kompensiert, so dass der Benutzer das Gefühl bekommt, seitlich abzudriften. Neben diesen praktischen Gesichtspunkten ist ein Vorgehen, bei dem das Problem eines Moduls in ein anderes verlagert wird, unsystematisch und führt zu überflüssigen Abhängigkeiten zwischen den Modulen, so dass sie nicht mehr frei kombiniert werden können.

4.3.2 Benutzermodell bei zielgerichteter Fortbewegung

Das Verhalten des Benutzers bei zielgerichteter Fortbewegung wurde schon in Abschnitt 1.1.2 kurz dargestellt. Da für die Ausführungen in den folgenden Abschnitten, insbesondere für die Herleitung der Reglerkomponente, aber ein detailliertes Modell des Nutzerverhaltens benötigt wird, soll es an dieser Stelle noch einmal aufgegriffen und verfeinert werden. Abbildung 4.11 stellt das hier beschriebene Benutzermodell grafisch dar.

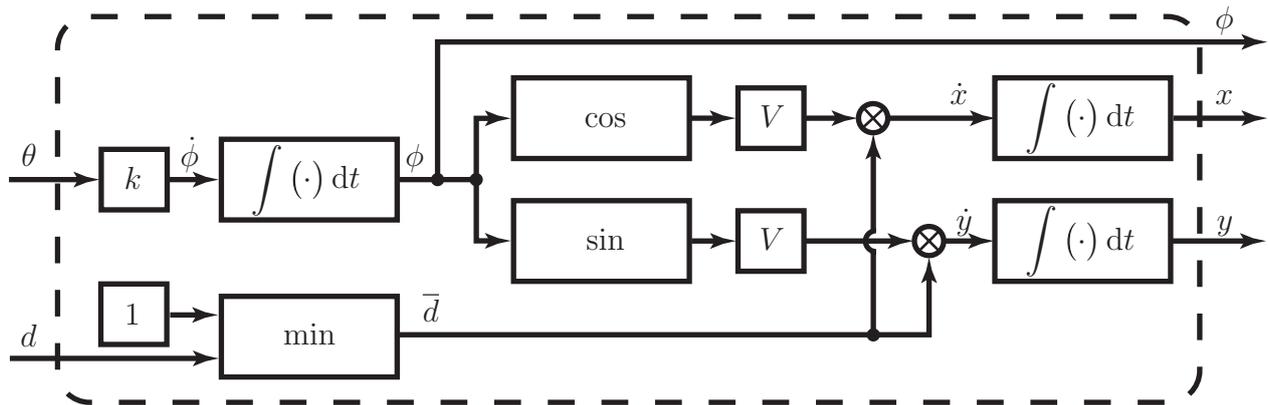


Abbildung 4.11: Modell des Benutzerverhaltens bei zielgerichteter Fortbewegung.

Das hier vorgestellte Benutzermodell ist nicht auf telepräsenre Fortbewegung beschränkt, sondern gilt allgemein für zielgerichtete Fortbewegung. Bei telepräsenre Bewegung ist allerdings zu beachten, dass alle betrachteten Größen in der Zielumgebung angesiedelt sind, da der Benutzer vollständig in diese eingetaucht ist und sich mit dem Proxy identifiziert.

Der Zustand des Modells ist durch die Lage des Benutzers

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

gegeben, wobei x und y die Positionskoordinaten und ϕ die Bewegungsrichtung²⁴ darstellen.

Das Zielobjekt $\underline{x}_G = [x_G \ y_G]^T$, auf das sich der Benutzer zubewegt, fließt in Form des wahrgenommenen Fehlwinkels $\theta = \text{atan2}(\underline{x}_G - \underline{x}) - \phi$ und des Abstands $d = \sqrt{(x_G - x)^2 + (y_G - y)^2}$ zwischen Benutzer und Zielobjekt²⁵ als Eingangsgröße in das Modell ein.

Die Bewegung des Benutzers ist dann, entsprechend der Beobachtung, dass der Fehlwinkel zum Ziel nicht vollständig ausgeglichen wird, durch

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} V\bar{d} \cos(\phi) \\ V\bar{d} \sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

gegeben, wobei $\bar{d} = \min(1, d)$ der beschränkte Abstand zum Ziel ist. Die Bewegungsgeschwindigkeit V des Benutzers wird hierbei als bekannt und invariant angenommen. Solange der Benutzer noch weit vom Ziel entfernt ist, gilt also $V \cdot \bar{d} = V$, d.h. der Benutzer bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts. Kommt er dem Ziel näher, verringert er die Geschwindigkeit und kommt am Ziel zu stehen.

Die Konstante k modelliert dabei sämtliche Effekte, die aufgrund der Wahrnehmung und Dynamik des Benutzers entstehen.

²⁴ Zur Vereinfachung wird hier angenommen, dass sich Blick- und Bewegungsrichtung entsprechen.

²⁵ Vergleiche hierzu die relativen Merkmale aus Kapitel 4.2.3.

Experimentelle Bestimmung der Konstante k

Um die Konstante k zu bestimmen, sollen reale Benutzerdaten mit dem Bewegungsmodell aus Gleichung (4.40) verglichen werden. Hierzu wurde ein Telepräsenzexperiment durchgeführt, da sich dabei genaue Bewegungsdaten des Benutzers ermitteln lassen. Durch Erstellen einer speziellen Zielumgebung, die nur aus einer ebenen Fläche mit einem weithin gut sichtbaren Zielobjekt besteht und keine Hinweise auf den ursprünglich beabsichtigten Pfad bereithält, kann der Einfluss der Umgebung auf das Experiment minimiert werden. Der Einfluss der Bewegungskompression wirkt sich positiv auf das Experiment aus, da hierdurch der wahrgenommene Fehlwinkel θ größer ist und somit auch k besser zu beobachten ist.

Für das Experiment wurde die Standardbenutzerführung, wie sie in [76] beschrieben ist, verwendet. Das bedeutet insbesondere, dass die Abweichungen vom Pfad in der Benutzerumgebung wie oben beschrieben durch Pfadprädiktion und -transformation kompensiert werden. Die Abweichungen in der Zielumgebung bleiben davon allerdings unberührt, weshalb für die Auswertung auch nur die Zielumgebung betrachtet wird.

Die Aufgabe für den Benutzer war, auf einer geraden Strecke zu dem 50 m vor ihm liegenden Objekt zu gehen. Der ursprünglich beabsichtigte Pfad lässt sich also durch eine gerade Linie von Startposition zu Zielposition beschreiben. Dieses Experiment wurde fünfmal durchgeführt, um Variationen im Benutzerverhalten entgegenzuwirken. Von den so erhaltenen tatsächlichen Pfaden wurde jeweils die größte Abweichung bestimmt und daraus das Mittel gebildet. Der mittlere maximale Fehler der fünf Benutzerläufe liegt bei $\bar{d}_{\text{Pfad,max}} = -2,32$ m. Um k zu bestimmen, wurde das Experiment in der Simulation reproduziert und k variiert bis die maximale Abweichung ungefähr $\bar{d}_{\text{Pfad,max}}$ entspricht. Bei einem Wert von $k = 4,5 \frac{1}{s}$ wurde eine maximale Abweichung von $d_{\text{Pfad,max}} = -2,2$ m erreicht. Abbildung 4.12 zeigt einen Vergleich zwischen den vom Benutzer zurückgelegten Pfaden und dem Pfad des Benutzermodells.

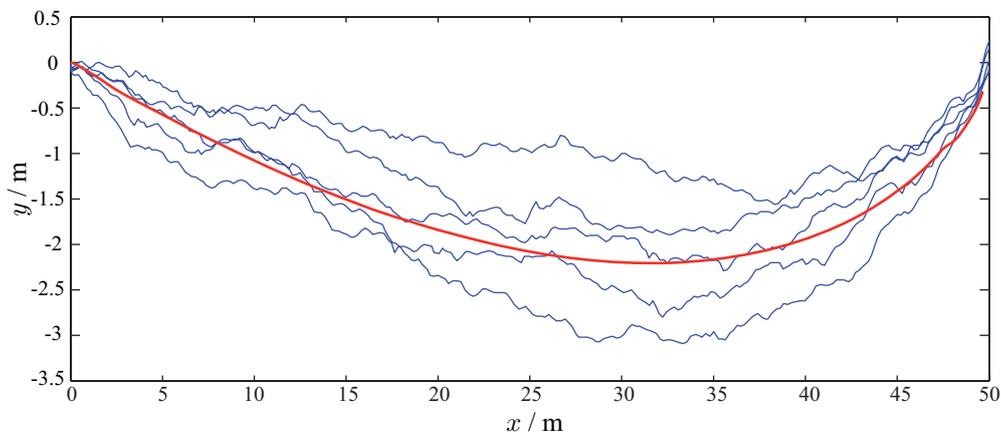


Abbildung 4.12: Vergleich der vom realen Benutzer (blau) und vom Benutzermodell (rot) zurückgelegten Pfade.

4.3.3 Lösungsansatz

Um ein Verlassen des Pfads zu verhindern, ist es also nötig, den Benutzer so zu beeinflussen, dass er die durch die Bewegungskompression verstärkten seitlichen Abweichungen kompensiert. Die einzige Möglichkeit zur Beeinflussung des Benutzers liegt in der Manipulation seiner Wahrnehmung der Zielumgebung, um dadurch insgesamt ein Verhalten zu erreichen, das in etwa der pfadgerichteten Bewegung entspricht. Das Ziel dabei ist es, durch geschickten Einsatz einer Reglerkomponente den Benutzer bei Abweichungen wieder zum Pfad zurückzuleiten, bzw. einem Abweichen entgegenzuwirken.

Dies kann dadurch erreicht werden, dass die Transformation zwischen Benutzer- und Zielumgebung um einen fehlerabhängigen Teil ergänzt wird. Da hier in erster Linie die Orientierung des Benutzers beeinflusst werden soll, lässt sich dieser fehlerabhängige Teil als homogene Rotationsmatrix

$$\mathbf{R}_{\Gamma,k} = \begin{bmatrix} \cos(\Gamma_k) & \sin(\Gamma_k) & 0 \\ -\sin(\Gamma_k) & \cos(\Gamma_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

beschreiben. Γ_k kann dabei proaktiv basierend auf dem Systemwissen so gewählt werden, dass ein Abweichen vom Pfad verhindert wird. Üblicher ist allerdings eine reaktive Vorgehensweise, bei der $\Gamma_k = \Gamma(d_{\text{Pfad}})$ ein vom Abstand zum Pfad d_{Pfad} abhängiger Winkel ist.

Positionstransformation

Mit obiger Überlegung stellt sich die Frage, wie die zusätzliche Rotation $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$, egal ob bei proaktiver oder reaktiver Vorgehensweise, in die Berechnung der Zielposition einfließen soll. Ein erster naiver Ansatz, der sich allerdings als nicht erfolgreich erweisen wird, ist die *Positionstransformation*. Sie soll trotzdem hier vorgestellt werden, da sie das Verständnis der erfolgreichen Lösung erleichtert.

Bei der Positionstransformation wird die inkrementelle Transformation $\mathbf{T}_{\text{ink},k}$ um $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ erweitert. Die resultierende Transformation zwischen Benutzer- und Zielumgebung ist dementsprechend durch

$${}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k+1} = {}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k} \cdot \mathbf{T}_{\text{ink},k} \cdot \mathbf{R}_{\Gamma,k} \quad (4.42)$$

gegeben. Da $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ kumulativ in ${}^{OT}\mathbf{T}_{OU}$ einfließt, sind die Orientierungen relativ zum Pfad in beiden Umgebungen unterschiedlich.

Das Vorgehen bei der Positionstransformation ist in Abbildung 4.13 beispielhaft bei proaktiver Handlungsweise dargestellt. Von der Situation in Abbildung 4.13(a) ausgehend wird die Transformation zwischen den beiden Umgebungen durch $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ modifiziert, so dass, wie in Abbildung 4.13(b) dargestellt, der Orientierungsfehler in der Zielumgebung größer ist als in der Benutzerumgebung. Bewegt sich der Benutzer jetzt dem Modell aus Gleichung (4.40) entsprechend, korrigiert er zwar basierend auf dem Orientierungsfehler aus der Zielumgebung

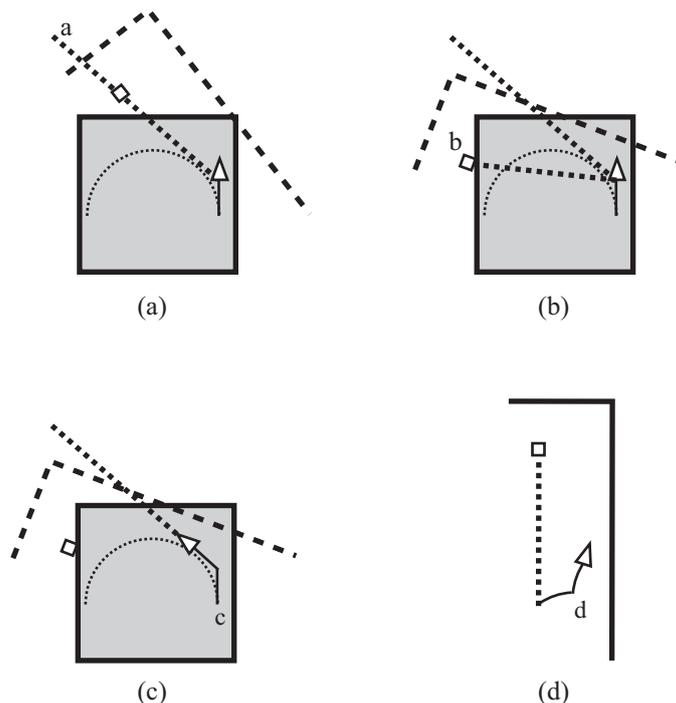


Abbildung 4.13: Die Positionstransformation hält den Benutzer auf dem Benutzerpfad, der Proxy weicht allerdings weiterhin vom Zielpfad ab. Dargestellt sind Sollorientierung des Benutzers a, Ziel nach der zusätzlichen Rotation b, der Benutzerpfad c und der Zielpfad d.

den kleineren Fehler in der Benutzerumgebung (Abbildung 4.13(c)), diese Richtungsänderung reicht allerdings nicht aus, den größeren Fehler in der Zielumgebung zu kompensieren (Abbildung 4.13(d)).

Die Positionstransformation ist also nicht geeignet, um den Benutzer in beiden Umgebungen auf dem Pfad zu führen. Außerdem wird dabei mit der Winkeltreue der Bewegung eine der Grundbedingungen für die Bewegungskompression verletzt. Interessanterweise entspricht dieses Verfahren im Ergebnis weitestgehend dem in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Vorgehen bei der Standardbenutzerführung, auch wenn beide Verfahren auf grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen basieren.

Blicktransformation

Der Fehler bei der Positionstransformation liegt darin, dass die fehlerabhängige Rotation $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ kumulativ in die Transformation einfließt und so der Fehler in der Zielumgebung tatsächlich vergrößert wird.

Um zu erreichen, dass der Benutzer auf dem Pfad geregelt wird, muss er den Fehler aber größer wahrnehmen als er tatsächlich ist. Dies wird durch die *Blicktransformation* erreicht. Bei der Blicktransformation fließt $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ nicht in die Transformation ${}^{OT}\mathbf{T}_{HT,k}$ ein, stattdessen wird die

Berechnung der Zielposition modifiziert, so dass

$${}^{OT}\mathbf{T}_{HT,k} = {}^{OT}\mathbf{T}_{OU,k} \cdot \mathbf{R}_{\Gamma,k} \cdot {}^{OU}\mathbf{T}_{HU,k} . \quad (4.43)$$

Auf diese Art und Weise ist der Einfluss von $\mathbf{R}_{\Gamma,k}$ auf nur diese eine Berechnung beschränkt und beeinflusst die Transformation in den Folgeschritten nicht mehr.

Für den Benutzer bedeutet die Blicktransformation, dass er den Orientierungsfehler zum Ziel, der in beiden Umgebungen gleich ist, größer wahrnimmt. Dies lässt sich am besten anschaulich mit einem Drehen des Kopfs des Proxys beschreiben. Blick- und Bewegungsrichtung in der Zielumgebung weichen leicht voneinander ab, da der Benutzer aber nicht die propriozeptive Wahrnehmung des Proxys hat, nimmt er davon nichts wahr.

Abbildung 4.14 stellt das Vorgehen bei der Blicktransformation wieder am Beispiel von proaktiver Bestimmung von Γ_k dar. Von derselben Situation (Abbildung 4.14(a)) ausgehend wie zuvor wird die Blickrichtung in der Zielumgebung modifiziert, so dass der Benutzer, wie in Abbildung 4.14(b) dargestellt, einen größeren Orientierungsfehler wahrnimmt. Der Versuch, diesen größeren wahrgenommenen Fehler zu kompensieren, resultiert nach Gleichung (4.40) in einer geringeren Rotation, die idealerweise ausreicht, um den tatsächlichen Fehler in Benutzerumgebung (Abbildung 4.14(c)) und Zielumgebung (Abbildung 4.14(d)) auszugleichen.

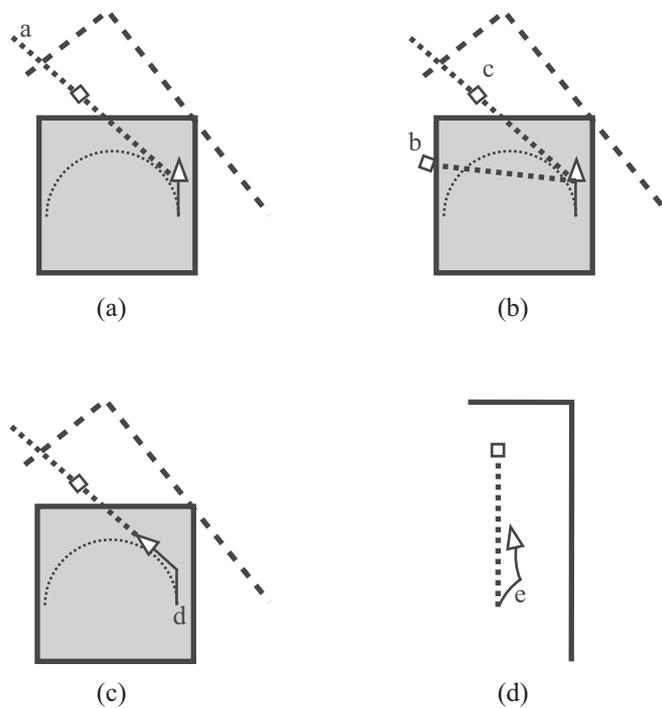


Abbildung 4.14: Die Blicktransformation lenkt sowohl Benutzer als auch Proxy auf dem Sollpfad. Dargestellt sind Sollorientierung des Benutzers a, wahrgenommene Zielposition b, tatsächliche Zielposition c, Benutzerpfad d und Zielpfad e.

4.3.4 Herleitung der Regelparameter

Für die Qualität der Fehlerkompensation ist es entscheidend, die zusätzliche Rotation \mathbf{R}_Γ bzw. ihren einzigen Parameter Γ zu bestimmen. Deshalb soll Γ zunächst proaktiv abgeschätzt werden. In einem zweiten Schritt wird Γ reaktiv als Stellgröße eines linearen Reglers definiert.

Abschätzung der Stellgröße

Die Blicktransformation Γ kann vollständig berechnet werden, wenn der komplette Systemzustand bekannt ist. Für das Modell aus Gleichung (4.40) heißt das insbesondere, dass die Geschwindigkeit V und der benutzerabhängige Parameter k bekannt sein müssen. Desweiteren soll angenommen werden, dass das Ziel weit vom Benutzer entfernt ist, d. h. $\bar{d} = 1$, dass sich der Benutzer zu Beginn auf dem Pfad befindet, d. h. $d_{\text{Pfad}} = 0$, und dass er zu Beginn in Richtung des Ziels orientiert ist, d. h. $\theta = 0$.

Der Benutzer bleibt auf dem Pfad, wenn seine Rotationsgeschwindigkeit gleich der Winkelgeschwindigkeit ω der relativen Bewegung beider Umgebungen ist. Folglich muss also

$$\dot{\phi} \stackrel{!}{=} \omega \quad (4.44)$$

gelten. Die relative Winkelgeschwindigkeit der beiden Umgebungen ω lässt sich aus der Bewegungsgeschwindigkeit V des Benutzers und dem Krümmungsunterschied der beiden Pfade berechnen. Bei geradem Zielpfad ist ω entsprechend durch

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (4.45)$$

gegeben, wobei $r = r(s) = \frac{1}{\kappa(s)}$ die Krümmung des Benutzerpfades an der momentanen Position des Benutzers ist.

Aus der Bedingung

$$\omega \stackrel{!}{=} k(\theta + \Gamma) \quad (4.46)$$

folgt dann für Γ

$$\Gamma = \frac{V}{k \cdot r} - \theta \quad (4.47)$$

Ist der Zielpfad eine Kreisbahn mit konstantem Radius $r = 2\text{ m}$, dann ergibt sich für eine konstante Bewegungsgeschwindigkeit $V = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und die Konstante $k = 4,5 \frac{1}{\text{s}}$ eine zusätzliche Blicktransformation von

$$\Gamma \approx 0.11 \approx 6.4^\circ \quad (4.48)$$

Stabiler Proportionalregler

Da in einem realen System der genaue Systemzustand natürlich nicht immer bekannt ist, wird in diesem Abschnitt ein Regelgesetz hergeleitet, das die Blicktransformation Γ abhängig vom Abstand zum Pfad d_{Pfad} einstellt. Im Fall eines Proportionalreglers gilt dann

$$\Gamma = K_P \cdot d_{\text{Pfad}} \quad (4.49)$$

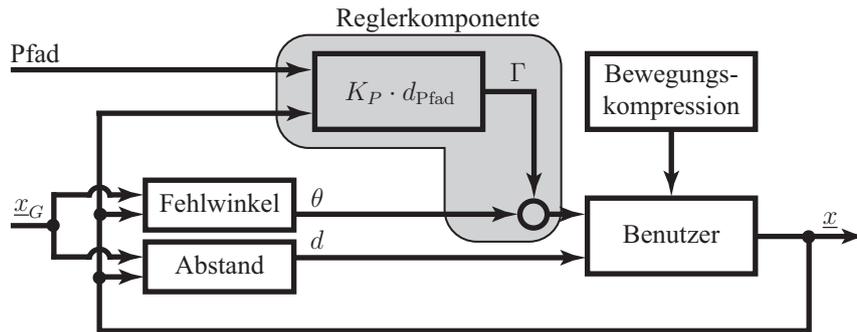


Abbildung 4.15: Die Reglerkomponente beeinflusst den vom Benutzer wahrgenommenen Fehlwinkel zum Ziel abhängig vom Abstand zum beabsichtigten Pfad. Die Bewegungskompression wirkt als systematische Störung auf das Pfadfolgeverhalten des Benutzers.

Ein solcher Regler ist schematisch in Abbildung 4.15 dargestellt. Um einen stabilen Regler zu erhalten, wird die direkte Methode von Ljapunow herangezogen.

Durch die Funktion

$$G(\underline{x}) = \frac{1}{2} \left(a(x_G - x)^2 + b(y_G - y)^2 + c(\phi - \phi_G)^2 \right) \quad (4.50)$$

ist der generalisierte quadratische Abstand zum Ziel gegeben, wobei

$$\underline{x}_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \phi_G \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Position und Orientierung im Ziel darstellt, und a , b und c beliebige positive Konstanten sind.

Zur Vereinfachung der Herleitung sei im Folgenden ohne Beeinflussung der Allgemeinheit angenommen, dass

$$\underline{x}_G = \underline{0} . \quad (4.52)$$

Weiter wird angenommen, dass sich der Benutzer im vierten Quadranten befindet, d. h. $x, y \leq 0$, und die negative x -Achse den Sollpfad darstellt. Damit ist die Distanz zum Pfad d_{Pfad} durch

$$d_{\text{Pfad}} = -y \quad (4.53)$$

gegeben. Wählt man $a = c = 1$, erhält man für G die vereinfachte Form

$$G(\underline{x}) = \frac{1}{2} \left(x^2 + by^2 + \phi^2 \right) . \quad (4.54)$$

Da das vorliegende Modell nur dann das Benutzerverhalten hinreichend gut beschreibt, wenn er sich auf sein Ziel zubewegt, d. h. er grob in Richtung des Ziels orientiert ist, kann angenommen werden, dass $\theta \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]$. Ein Modell für einen ziellos umhergehenden Benutzer wäre sehr kompliziert und würde die Zielsetzung dieses Abschnitts überschreiten. Der Abstand des

Benutzers ist üblicherweise im Verhältnis zur Länge des Pfads sehr klein. Es kann also angenommen werden, dass die seitliche Abweichung kleiner ist als der Abstand zum Ziel auf dem Pfad, d. h. $|x| > |y|$, und, da nur der vierte Quadrant betrachtet wird, dass $x < y$ gilt. Damit gilt für den Winkel $\alpha = \text{atan2}(-x, -y) \in [0, \frac{\pi}{4})$.

Die Untersuchungen in [114] ergaben, dass menschliche Benutzer üblicherweise schon in erheblichem Abstand zu einem Ziel stehen bleiben, bzw. sich auf ein neues Ziel zubewegen. Es ist also unproblematisch anzunehmen, dass $d > \sqrt{2}$. Das bedeutet insbesondere auch, dass $\bar{d} = 1$. Die für die Herleitung des Reglers betrachtete Region ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Für die anderen Regionen lassen sich analoge Lösungen finden.

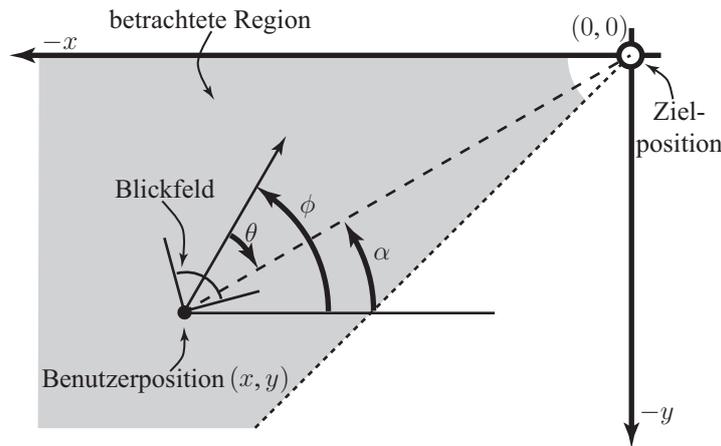


Abbildung 4.16: Die bei der Herleitung des Reglers betrachtete Region.

Mit $G(\underline{x}) > 0$ für alle $\underline{x} \neq \underline{0}$ und $G(\underline{0}) = 0$ ist G eine Ljapunow-Funktion. Damit ist ein Regler asymptotisch stabil, wenn für die zeitliche Ableitung \dot{G} von G gilt, dass

$$\dot{G}(\underline{x}) < 0 \quad (4.55)$$

für alle \underline{x} aus der oben beschriebenen Region.

Die zeitliche Ableitung von G ist gegeben durch

$$\dot{G}(\underline{x}) = \frac{\partial G(\underline{x})}{\partial \underline{x}^T} \dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} x & b \cdot y & \phi \end{bmatrix} \dot{\underline{x}} . \quad (4.56)$$

Mit $\dot{\underline{x}}$ aus Gleichung (4.40) und $\bar{d} = 1$ erhält man

$$\begin{aligned} \dot{G}(\underline{x}) &= Vx \cos(\phi) + bVy \sin(\phi) + k\phi \cdot (\theta + \Gamma) \\ &= Vx \cos(\phi) + bVy \sin(\phi) + k\phi\theta + k\phi K_P \cdot y . \end{aligned} \quad (4.57)$$

Es ist leicht zu sehen, dass $\dot{G}(x) < 0$, falls $\phi = 0$. Für die übrigen Fälle wird der Proportionalfaktor K_P des Reglers in Abhängigkeit von den zahlreichen Systemparametern so bestimmt, dass der Regler stabil ist.

1. Fall: θ ist negativ, d. h. $\theta \in [-\frac{\pi}{4}, 0]$ und damit $\phi \in (0, \frac{\pi}{2})$.

$$\begin{aligned} 0 &\stackrel{!}{>} Vx \cos(\phi) + bVy \sin(\phi) + k\phi\theta + k\phi K_P \cdot y \\ &= \underbrace{Vx \cos(\phi)}_{\leq 0} + \underbrace{y}_{< 0} \cdot (bV \sin(\phi) + k\phi K_P) + \underbrace{k\phi\theta}_{\leq 0} \end{aligned} \quad (4.58)$$

Die rechte Seite aus Gleichung (4.58) ist negativ, wenn

$$bV \sin(\phi) + k\phi K_P > 0 . \quad (4.59)$$

Das ist der Fall für ein beliebiges $K_P \geq 0$.

2. Fall: Sei $\theta \in (0, \frac{\pi}{4}]$ und $\phi \in (0, \frac{\pi}{4}]$. Damit

$$0 \stackrel{!}{>} \underbrace{Vx \cos(\phi)}_{< 0} + y \cdot (bV \sin(\phi) + k\phi K_P) + k\phi\theta \quad (4.60)$$

gilt, genügt es ein K_P zu finden, so dass

$$0 \geq y \cdot (bV \sin(\phi) + k\phi K_P) + k\phi\theta \quad (4.61)$$

$$\Leftrightarrow yk\phi K_P \leq -ybV \sin(\phi) - k\phi\theta . \quad (4.62)$$

Wegen $\theta > 0$ folgt aus den Voraussetzungen, dass $y < 0$ und damit $yk\phi < 0$, also gilt für K_P , dass

$$K_P \geq -\frac{bV \sin(\phi)}{k} \frac{\theta}{\phi} - \frac{\theta}{y} . \quad (4.63)$$

3. Fall: $\theta \in (0, \frac{\pi}{4}]$ und $\phi \in [-\frac{\pi}{4}, 0)$. Für $y < 0$ gilt $\dot{G} < 0$, falls

$$K_P < \frac{Vx \cos(\phi)}{k} \frac{\theta}{y\phi} + \frac{Vb \sin(\phi)}{k} \frac{\theta}{\phi} + \frac{\theta}{y} . \quad (4.64)$$

Im Fall von $y = 0$ lässt sich Gleichung (4.57) zu

$$0 \stackrel{!}{>} Vx \cos(\phi) + k\phi\theta \quad (4.65)$$

vereinfachen, was immer erfüllt ist, da in diesem Fall $\phi = -\theta$ gilt.

Um einen konkreten Proportionalfaktor K_P für den Regler zu erhalten, setzt man in die obigen Bedingungen für K_P die zuvor bestimmten Werte von $V = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $k = 4,5 \frac{1}{\text{s}}$ ein. Falls ein Wert für b gefunden werden kann, so dass sich alle der obigen Bedingungen erfüllen lassen, ist ein stabiler Regler gefunden. Wertet man für $b = 1$ die Bedingungen aus Gleichung (4.63) und Gleichung (4.64) für den gesamten betrachteten Bereich aus, erhält man für K_P

$$0,53 \leq K_P \leq 1 . \quad (4.66)$$

Entsprechend wurde der Regler mit $K_P = 1 \frac{1}{\text{m}}$ implementiert.

4.3.5 Geregelte Benutzerführung bei dynamischer Bewegungskompression

Um die geregelte Benutzerführung auch praktisch einsetzbar zu machen, muss sie auch mit der dynamischen Bewegungskompression kombinierbar sein. Hierzu muss die Pfadprädiktion und dabei vor allem die Wahl des Planungsbezugspunkts angepasst werden.

Bisher wurde bei dynamischer Pfadprädiktion stets die aktuelle Proxyposition \underline{x}_T als Planungsbezugspunkt gewählt. Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, war das ohne geregelte Bewegungskompression von großer Wichtigkeit, da sonst die Zielumgebung verlassen wird. Diese *fehlerberreinigende* Prädiktion stellt allerdings einen Bruch in der Systematik der Bewegungskompression dar, da hierdurch ein Problem, das in der Benutzerführung entsteht, in der Pfadprädiktion kompensiert wird. Als Resultat wird, selbst wenn sich der Zielpfad des Benutzers nicht ändert, in jedem Schritt ein anderer Pfad prädiziert.

Darüber hinaus hätte die geregelte Benutzerführung in Kombination mit der fehlerberreinigenden Pfadprädiktion keine Wirkung, da der Abstand zum Pfad d_{Pfad} , der ausgeregelt werden soll, bei jedem Prädiktionsschritt zu Null gesetzt wird. Deshalb muss die fehlerberreinigende Pfadprädiktion durch eine *fehlererhaltende* Pfadprädiktion ersetzt werden, bei der d_{Pfad} nicht verändert wird. Wie eine solche Prädiktion aussieht, ist allerdings stark von der Form des Zielpfads abhängig.

Pfadprädiktion bei geraden Zielpfaden

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wird bei geraden Zielpfaden der Pfad in der Zielumgebung immer als eine gerade Linie zwischen dem Planungsbezugspunkt $\underline{\rho}_T$ und dem Zielpunkt $\underline{x}_{G,T}$ angenommen. Für eine fehlererhaltende Prädiktion ist also nur die Wahl des Planungsbezugspunkts, der bisher immer als $\underline{\rho}_T = \underline{x}_T$ gewählt wurde, anzupassen. Die Erkennung des Ziels $\underline{x}_{G,T}$ bleibt davon unberührt.

Für den Planungsbezugspunkt muss gelten, dass der Abstand zwischen $\underline{\rho}_T$ und \underline{x}_T dem Abstand d_{Pfad} zum bisherigen Pfad entspricht. Außerdem muss, entsprechend der Definition des Abstands zu einer Geraden, die Verbindungsstrecke von \underline{x}_T und $\underline{\rho}_T$ senkrecht zum Pfad stehen.

Für dieses Problem gibt es eine einfache geometrische Lösung. Hierfür wird zunächst ein Kreis K_d um die Proxyposition \underline{x}_T mit dem Radius d_{Pfad} angenommen. Alle Punkte auf diesem Kreis erfüllen die erste der oben beschriebenen Bedingungen. Die zweite Bedingung erfüllen alle Punkte, die auf dem Thaleskreis K_t über der Verbindungsstrecke von \underline{x}_T und $\underline{x}_{G,T}$ liegen. Als mögliche Planungsbezugspunkte erhält man also die maximal zwei Schnittpunkte der Kreise K_t und K_d . Von diesen ist derjenige zu wählen, der das Vorzeichen von d_{Pfad} erhält. Abbildung 4.17 verdeutlicht die geometrische Bestimmung des Planungsbezugspunkts.

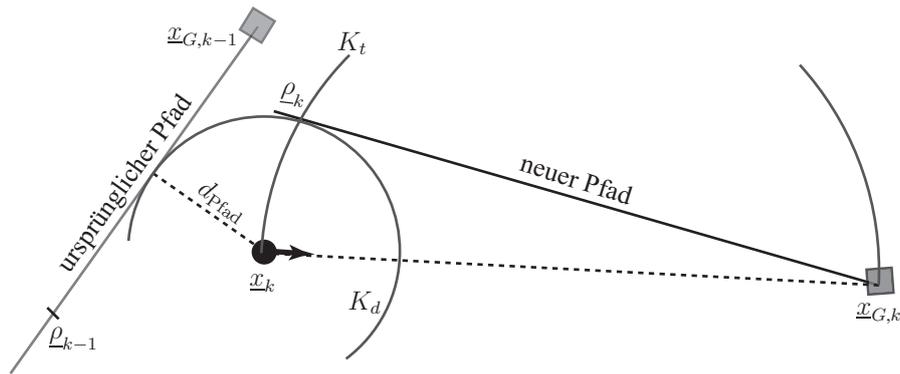


Abbildung 4.17: Fehlererhaltende Bestimmung des Planungsbezugspunkts und Pfadprädiktion in der Zielumgebung bei geraden Zielpfaden.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden grundlegende neue Verfahren für die Bewegungskompression zur weiträumigen telepräsenten Fortbewegung eingeführt. Dabei wurden neue Lösungen für alle drei Komponenten Pfadprädiktion, Pfadtransformation und Benutzerführung entwickelt.

In bekannten Zielumgebungen lässt sich die Pfadprädiktion auf die Erkennung des aktuellen Ziels des Benutzers reduzieren. Hierfür wurde ein auf einem hybriden Bayes'schen Schätzer basierender Ansatz vorgestellt. Durch die stochastische Zielerkennung wurde der Baukasten der einzelnen zur Verfügung stehenden Implementierungen für die Bewegungskompression so erweitert, dass sich das System besser an die jeweiligen Anforderungen anpassen lässt.

Mit der geregelten Benutzerführung wurde ein systematischer Ansatz gefunden, den Benutzer auf dem transformierten Benutzerpfad zu regeln, um ein Verlassen der Benutzerumgebung zu verhindern. Bisher wurde dies durch eine modifizierte Pfadprädiktion erreicht, was zu einer unerwünschten Verflechtung der drei funktionalen Teile der Bewegungskompression geführt hat. Dieses neue Verfahren ist für den Benutzer weitestgehend transparent, erleichtert dem Entwickler aber die Einführung anderer Pfadprädiktionsalgorithmen. Ein weiterer positiver Effekt der geregelten Benutzerführung wird in Verbindung mit der stochastischen Pfadprädiktion sichtbar: Wurde das korrekte Ziel erkannt, bewegt sich der Benutzer in der Zielumgebung sehr nah entlang des vorhergesagten geradlinigen Zielpfades. Bei der unregelmäßigen Benutzerführung weicht der Benutzer stark von diesem Pfad ab.

Die für Anwendungen wohl bedeutendste Neuerung dieses Kapitels ist allerdings die Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen. Durch Überarbeitung des Transformationsproblems ist es möglich, beliebige nicht-konvexe, zusammenhängende Gebiete als Benutzerumgebung zu verwenden. Hierdurch ist eine wesentlich bessere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Raums gegeben, was einen vielseitigeren Einsatz der Bewegungskompression erlaubt.

KAPITEL 5

Weiträumige haptische Interaktion

Mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Methoden lässt sich ein Telepräsenzsystem realisieren, das weiträumige Exploration beliebiger Zielumgebungen aus einer begrenzten Benutzerumgebung heraus erlaubt. Um allerdings einen möglichst realistischen Eindruck beim Kontakt mit Begrenzungen der Zielumgebung oder bei der Manipulation, vor allem schwerer Gegenstände, zu gewährleisten, wird noch eine Möglichkeit zur haptischen Rückkopplung an den Benutzer benötigt.

Dabei ist es natürlich wichtig, dass die haptische Schnittstelle die Bewegungsfreiheit des Benutzers in der Benutzerumgebung nicht einschränkt, da sonst eine intuitive weiträumige Bewegung nicht mehr möglich ist. Das heißt, dass eine solche haptische Schnittstelle den gesamten kartesischen Arbeitsraum der Benutzerumgebung bei beliebiger Orientierung um die Körperachsen erreichen können muss, ohne dabei in eine singuläre Konfiguration zu geraten.

Die Darstellung haptischer Eindrücke, wie sie in Abschnitt 1.1.3 beschrieben wurden, lässt sich nach [60, 64] gut von der taktilen Darstellung trennen. Da es für letztere bereits kommerzielle Produkte gibt²⁶, soll diese hier nicht weiter berücksichtigt werden.

5.1 Semi-mobile haptische Schnittstellen

Betrachtet man die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Typen von haptischen Schnittstellen, muss man feststellen, dass es gegenwärtig für die weiträumige Telepräsenz nur bedingt geeignete Konzepte von haptischen Schnittstellen gibt. Die tragbaren haptischen Schnittstellen sind schon allein wegen ihres Gewichts, das vollständig vom Benutzer zusätzlich zu Head-Mounted-Display und Tracking-Hardware getragen werden muss, auszuschließen. Darüber hinaus ist ihre Darstellungsqualität nicht akzeptabel. Die boden- bzw. deckengebundenen Schnittstellen überzeugen zwar in ihrer Darstellungsqualität, schränken aber den Arbeitsraum des Benutzers zu stark ein.

²⁶ http://www.immersion.com/3d/products/cyber_grasp.php
http://www.immersion.com/3d/products/cyber_touch.php

Vielversprechend scheint zunächst das Konzept der mobilen haptischen Schnittstellen. Allerdings hängt bei diesen Systemen die Darstellungsqualität stark von der Lokalisierungsgenauigkeit der mobilen Plattform ab, so dass hierfür ein zusätzliches Lokalisierungssystem unbedingt nötig ist. Der Komplexitätsgrad bei der Regelung eines solchen Systems liegt aufgrund der aufwändigen Regelungsalgorithmik für mobile Plattformen häufig weit über dem einer herkömmlichen bodenbasierten haptischen Schnittstelle.

Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel ein neues Konzept für haptische Schnittstellen vorgestellt werden, das die Vorzüge mobiler haptischer Schnittstellen mit denen bodengebundener Systeme kombiniert. Diese neue Klasse haptischer Schnittstellen heißt *semi-mobile haptische Schnittstellen* (SMHI), da sie wie mobile haptische Schnittstellen beliebige weiträumige Bewegung mit gleichzeitiger haptischer Interaktion erlauben, diese Eigenschaft allerdings auf die begrenzte Benutzerumgebung beschränkt ist. Eine solche SMHI ist also ideal geeignet für weiträumige Telepräsenz Anwendungen, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit beschrieben wurden, da hierbei stets räumlich begrenzte Benutzerumgebungen angenommen wurden.

5.2 Trennung von weiträumiger Bewegung und haptischer Darstellung

Die Grundidee der SMHI besteht in der Trennung von weiträumiger Bewegung und haptischer Interaktion. Hierzu hat sie, wie auch eine mobile haptische Schnittstelle, zwei Subsysteme, einen haptischen Manipulator und eine Vorpositioniereinheit. Die Aufgabe des haptischen Manipulators besteht darin, dem Benutzer je nach Bedarf definierte Kräfte und Momente, z. B. über einen Handgriff, auf den Arm darzustellen. Die Vorpositioniereinheit ist nur dafür zuständig, den haptischen Manipulator stets mit der Bewegung des Benutzers zu führen, so dass der Benutzer nie den Arbeitsraum des haptischen Manipulators verlässt. Diese Trennung kann nur für solche Freiheitsgrade erreicht werden, die redundant, d. h. sowohl in Vorpositioniereinheit als auch haptischem Manipulator, vorhanden sind.

Der große Unterschied zu den mobilen haptischen Schnittstellen besteht darin, dass es sich bei der Vorpositioniereinheit nicht um eine mobile Roboterplattform, sondern wiederum um ein bodengebundenes Robotersystem handelt, dessen Arbeitsraum die gesamte Benutzerumgebung abdeckt. Ein solcher Aufbau hat den großen Vorteil, dass auch ohne externes Trackingsystem durch die Daten aus den Gelenkencodern immer die genaue, nur durch etwaige mechanische Elastizitäten verfälschte, Lage der einzelnen Gelenke und damit auch des Endeffektors bestimmt werden kann. Bei geschickter Wahl der Kinematik der Vorpositioniereinheit lässt sich sowohl die Steifigkeit eines solchen Systems maximieren, als auch der Regelungsaufwand minimieren.

Die grundlegenden Konzepte für semi-mobile haptische Schnittstellen werden in den nächsten Abschnitten im Detail erläutert. In Kapitel 6 wird basierend auf diesen Konzepten eine beispielhafte Realisierung dieses neuen Typs haptischer Schnittstellen entwickelt.

5.3 Regelungskonzept der semi-mobilen haptischen Schnittstelle

Da die beiden Subsysteme der haptischen Schnittstelle bei der Regelung unterschiedliche Aufgaben übernehmen, ist es sinnvoll sie auch kinematisch getrennt zu betrachten. So lässt sich die Endeffektorlage bezüglich des Basiskoordinatensystems durch die kinematische Kette

$${}^B\mathbf{T}_E = {}^B\mathbf{T}_L \cdot {}^L\mathbf{T}_E \quad (5.1)$$

beschreiben, wobei ${}^B\mathbf{T}_L$ die Lage des Manipulatorfußes, also der Anschlussstelle des haptischen Manipulators an der Vorpositioniereinheit, darstellt und allein durch die Konfiguration der Vorpositioniereinheit gegeben ist. ${}^L\mathbf{T}_E$ hingegen ist vollständig durch die Konfiguration $\underline{\gamma}$ des haptischen Manipulators beschrieben. Betrachtet man nur die reine Position der einzelnen Bezugssysteme, lässt sich Gleichung (5.1) zu

$$\underline{x}_E = \underline{x}_L + \underline{x}_S \quad (5.2)$$

vereinfachen. Im Folgenden soll diese übersichtliche Darstellung verwendet werden.

Basierend auf dieser kinematischen Aufteilung und dem Prinzip der Trennung von weiträumiger Bewegung und haptischer Darstellung wurde für die SMHI die in Abbildung 5.1 dargestellte Reglerarchitektur entwickelt. Sie macht sich zu Nutze, dass sich die Redundanzen der Kinematik ähnlich wie in [33] auflösen lassen. Dabei unterliegt der haptische Manipulator einer Kraftregelung, deren Ziel es ist, den tatsächlichen am Endeffektor gemessenen Kraftvektor \hat{F} dem von außen vorgegebenen Sollkraftvektor F_{soll} anzugleichen.

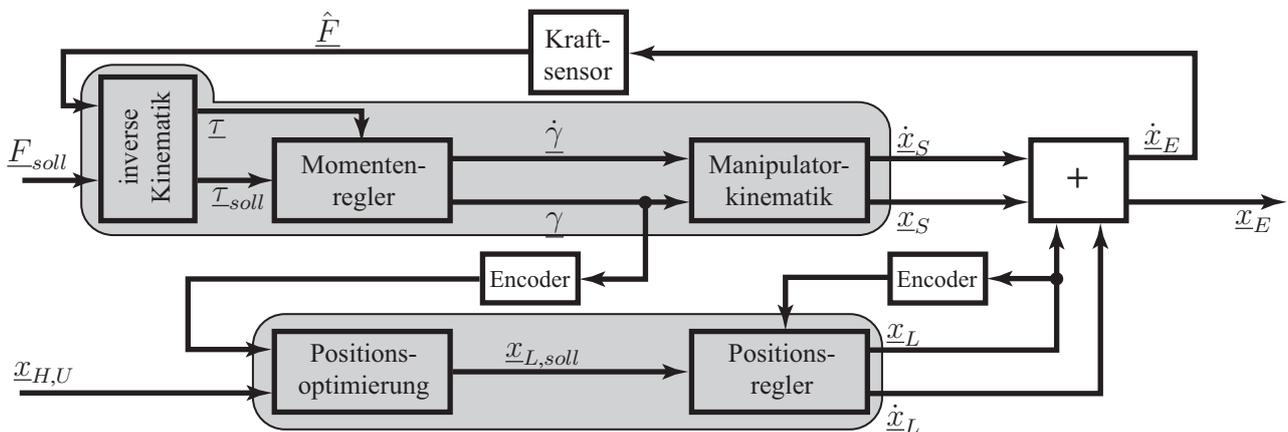


Abbildung 5.1: Reglerarchitektur der semi-mobilen haptischen Schnittstelle. Der haptische Manipulator ist kraftgeregelt, die Positionsregelung der Vorpositioniereinheit folgt einer weiteren Optimierung.

Abhängig von der aus der Kraftregelung resultierenden Manipulatorbewegung muss die Sollposition $\underline{x}_{L,soll}$ der Vorpositioniereinheit bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um eine Optimierung, die eine optimale haptische Darstellung gewährleisten soll. Basierend auf der Gelenksensorik und eventuellen zusätzlichen externen Informationsquellen wird einem noch zu

spezifizierenden Gütekriterium entsprechend die optimale Konfiguration $\underline{\gamma}^*$ des haptischen Manipulators bestimmt. Damit diese Konfiguration auch eingenommen werden kann, ist $\underline{x}_{L,soll}$ nach Gleichung (5.2) durch

$$\underline{x}_{L,soll} = \underline{x}_L^* = \underline{x}_E - \underline{x}_S^* \quad (5.3)$$

gegeben, wobei $\underline{x}_S^* = \underline{x}_S(\underline{\gamma}^*)$. Gemäß der so bestimmten Positionsvorgaben wird die Vorpositioniereinheit positionsgeregelt.

Da die Bewegung der Vorpositioniereinheit über die Kraftmessung am Endeffektor in die Kraftregelung rückgekoppelt wird, erfährt der Benutzer keine unerwartete Endeffektorbewegung, wenn sich die Vorpositioniereinheit bewegt. Bei der Vorpositionierung handelt es sich also um eine Nullraumbewegung.

5.4 Vorpositionierung durch Optimierung der Manipulierbarkeit

Eine für die haptische Darstellung geeignete Konfiguration nimmt der haptische Manipulator immer dann ein, wenn er in alle Richtungen gute Bewegungsmöglichkeiten hat. Eine Klasse von Maßen, die diese Bewegungsmöglichkeiten in Abhängigkeit seiner Konfiguration beschreiben, sind die sogenannten Dexteritätsmaße [112]. Einen Überblick über die verschiedenen Dexteritätsmaße und ihre Interpretation bietet [107]. Das am weitesten verbreitete Dexteritätsmaß, die sogenannte *Manipulierbarkeit* [111], wird in der Literatur [24] häufig in der Form

$$w(\underline{\gamma}) = \sqrt{\det\left(\mathbf{J}^T(\underline{\gamma})\mathbf{J}(\underline{\gamma})\right)} \quad (5.4)$$

gegeben, wobei $\mathbf{J}(\underline{\gamma})$ die Jacobi-Matrix der Kinematikgleichung des Manipulators bei der Konfiguration $\underline{\gamma}$ darstellt. Ist die Jacobi-Matrix regulär, lässt sich die Manipulierbarkeit vereinfacht als

$$w(\underline{\gamma}) = \left| \det\left(\mathbf{J}(\underline{\gamma})\right) \right| \quad (5.5)$$

darstellen.

Um ein besseres Verständnis für die Bedeutung der Manipulierbarkeit zu erhalten, ist es sinnvoll, eine weitere Darstellung zu betrachten. Wiederum unter der Voraussetzung, dass \mathbf{J} regulär ist, gilt

$$w(\underline{\gamma}) = \prod_{i=1}^n \sigma_i \quad (5.6)$$

wobei die σ_i die Singulärwerte der Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\underline{\gamma})$ darstellen. Die σ_i geben die Länge der Hauptachsen des Ellipsoids an, in dem alle Endeffektorgeschwindigkeiten $\dot{\underline{x}}$ enthalten sind, die durch Ansteuerung des Manipulators durch einen Gelenkgeschwindigkeitsvektor $\dot{\underline{\gamma}}$ mit Einheitslänge erreicht werden. Dies bedeutet insbesondere auch, dass für den Fall, dass mindestens ein $\sigma_i = 0$, eine singuläre Lage erreicht wird, bei der eine unendliche Gelenkwinkelgeschwindigkeit notwendig wäre, um den Endeffektor in Richtung der zu diesem σ_i gehörenden Hauptachse

zu bewegen. Aus diesem Grund kann durch Maximierung von $w(\underline{\gamma})$, das alle Ausdehnungen des Ellipsoids gleichmäßig betrachtet, der Abstand zu allen Singularitäten maximiert werden.

Mit

$$\underline{\gamma}^* = \arg \max_{\underline{\gamma}} (w(\underline{\gamma})) \quad (5.7)$$

ist also die gemäß Manipulierbarkeit optimale Konfiguration für den haptischen Manipulator gegeben. Je nach konkreter Realisierung und Anwendung ist es allerdings noch möglich, oder sogar nötig, weitere Optimierungsziele zur Optimierung hinzuzufügen.

5.5 Telemanipulation durch Krafrückkopplung

Bei einem solchen Regelungskonzept verhält sich die haptische Schnittstelle als Admittanz, d. h. die Bewegungen des haptischen Manipulators sind kausal durch die darzustellenden Kräfte bedingt. In Verbindung mit einem Teleoperator bzw. einer virtuellen Umgebung, die eine Impedanz darstellen, d. h. dass die Kräfte am Endeffektor Ergebnis seiner Bewegung sind, lässt sich eine Krafrückkopplung [2, 43] erreichen. Dieses in Abbildung 5.2 dargestellte Konzept der bilateralen Regelung besteht durch seine Einfachheit und lässt sich bei einem realen Teleoperator dadurch umsetzen, dass dessen Manipulatorarm entsprechend der Endeffektorposition \underline{x}_E positionsgeregelt wird. \underline{F}_{soll} kann direkt aus dem am Teleoperatorendeffektor angebrachten Kraftsensor gelesen werden.

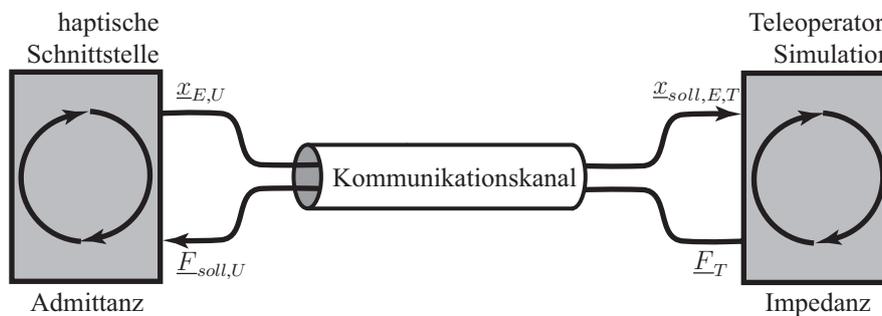


Abbildung 5.2: Bei der Krafrückkopplung verhält sich die haptische Schnittstelle als Admittanz und der Teleoperator bzw. die virtuelle Zielumgebung als Impedanz. Kraftvektoren und Endeffektorpositionen werden jeweils nur in eine Richtung durch einen Kommunikationskanal zwischen Benutzer- und Zielumgebung übertragen. Dabei werden die Daten gegebenenfalls durch die Bewegungskompression modifiziert.

Bei virtuellen Zielumgebungen können die Sollkräfte durch

$$\underline{F}_{soll} = -\mathbf{K} \cdot |\underline{x}_E - \underline{x}_W| - \mathbf{B} \cdot \dot{\underline{x}}_E - \mathbf{M} \cdot \ddot{\underline{x}}_E \quad (5.8)$$

berechnet werden, wobei \mathbf{M} die Massematrix des simulierten Endeffektors darstellt. \mathbf{K} und \mathbf{B} sind Diagonalmatrizen, die die positionsabhängigen Feder- bzw. Dämpfungskonstanten für

jede Richtung enthalten. $|\underline{x}_E - \underline{x}_W|$ stellt eine vereinfachte Schreibweise für die Eindringtiefe in eine durch \underline{x}_W charakterisierte Wand dar. Details zur Simulation einer virtuellen Umgebung mit diesen Parametern sind in [120] zu finden.

5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Konzept für die semi-mobilen haptischen Schnittstellen erarbeitet. Dabei handelt es sich um einen neuen Typ haptischer Schnittstellen, der unbeschränkte Bewegung innerhalb einer begrenzten Umgebung erlaubt. Damit sind die SMHI besonders auf die Bedürfnisse eines weiträumigen Telepräsenzsystems mit Bewegungskompression angepasst, eignen sich aber auch für die Kombination mit anderen Bewegungsschnittstellen.

Eine SMHI besteht aus zwei Subsystemen: einer in der Umgebung verankerten Vorpositionierungseinheit und einem daran angebrachten haptischen Manipulator. Diese Trennung spiegelt sich im Regelungskonzept wider. Der haptische Manipulator wird kraftgeregelt, um dem Benutzer die Kräfteindrücke aus der Zielumgebung möglichst realistisch zu vermitteln. Die Vorpositionierungseinheit wird dabei so geregelt, dass sich der haptische Manipulator stets in einer Konfiguration mit optimaler Manipulierbarkeit befindet.

Der Hauptvorteil dieses Konzepts gegenüber bekannten Systemen mit vergleichbaren Eigenschaften besteht darin, dass die Möglichkeit zur weiträumigen Bewegung nicht durch den Einsatz einer mobilen Roboterplattform und dem damit erhöhten Lokalisierungs- und Regelungsaufwand erkauft wird.

Prototypischer Aufbau einer semi-mobilen haptischen Schnittstelle

An dieser Stelle soll das Konzept der SMHI für das in Abschnitt 1.4 beschriebene Telepräsenzsystem realisiert werden. Da sich der Benutzer uneingeschränkt innerhalb seiner Benutzerumgebung bewegen soll, muss der Arbeitsraum der haptischen Schnittstelle die komplette Benutzerumgebung abdecken, d. h. er muss sich über einer Fläche von $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ ausdehnen und möglichst eine Höhe von $1,5\text{ m}$ haben, bei einer mittleren Arbeitshöhe von ca. 1 m . Um dem Benutzer tatsächliche weiträumige Bewegung zu erlauben, ist es allerdings wichtig, dass ein unendlicher rotatorischer Freiheitsgrad um die Raumsenkrechte besteht.

Das hier vorgestellte System soll in der Lage sein, dem Benutzer Kräfte bis zu 50 N darzustellen, was ausreichend ist, um dem Benutzer einen Eindruck von einem Kontakt mit einem festen Gegenstand zu geben. Auf die Darstellung von Momenten soll zunächst verzichtet werden, sie lässt sich allerdings durch Erweiterung des haptischen Manipulators um drei aktive rotatorische Gelenke erreichen.

6.1 Mechanisches Konzept für eine semi-mobile haptische Schnittstelle

Hier sollen kurz die mechanischen Lösungen für die beiden Subsysteme, haptischer Manipulator und Vorpositioniereinheit, wie sie in [116] entwickelt wurden, beschrieben werden. Dies ist einerseits für die kinematische Modellierung und damit für die Regelung des Systems von Interesse, andererseits wurden mit diesen beiden Subsystemen ungewöhnliche, aber an ihre Aufgabe gut angepasste Lösungen gefunden.

6.1.1 Linear-Vorpositioniereinheit

Wegen der hohen Steifigkeit und der Möglichkeit, das System rings um die Benutzerumgebung auf dem Boden abzustützen, fiel die Wahl der Vorpositioniereinheit auf ein Linearsystem mit drei rechtwinklig zueinander angeordneten Zahnriemenantrieben. Diese Antriebe können den

Manipulatorfuß des haptischen Manipulators mit Lineargeschwindigkeiten von bis zu $2 \frac{m}{s}$ bewegen, bei einer Beschleunigung von $2 \frac{m}{s^2}$. Es ist also sichergestellt, dass Gehbewegungen des Benutzers bei normaler Geschwindigkeit ausgeglichen werden können.

Durch ein solches System lassen sich die mechanischen Schwierigkeiten, die bei seriellen Kinematiken mit einem solchen Arbeitsraum entstehen, fast völlig vermeiden. Darüber hinaus wird die Regelung stark vereinfacht, da bei geschickter Wahl der Basiskoordinatensysteme der Konfigurationsraum dem kartesischen Raum entspricht. Abbildung 6.1 zeigt die Vorpositioniereinheit zusammen mit dem haptischen Manipulator.

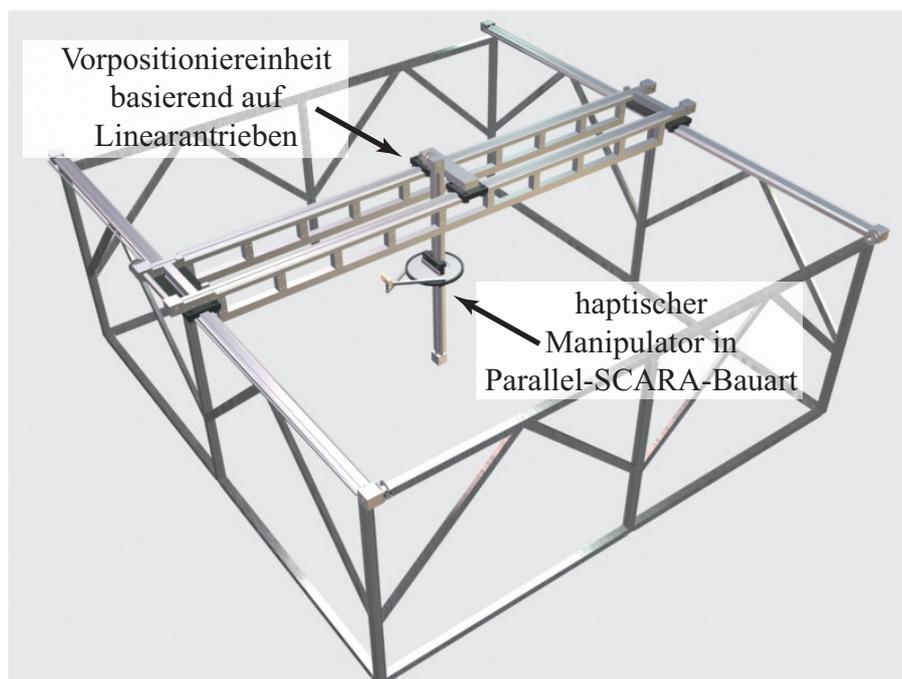


Abbildung 6.1: Simulation der hier vorgestellten SMHI. Die Vorpositioniereinheit wurde dabei aus den CAD-Daten erstellt, der haptische Manipulator ist gegenüber dem realen System stark vereinfacht und dient nur der Veranschaulichung des Konzepts.

6.1.2 Haptischer Manipulator in Parallel-SCARA-Bauart

Der haptische Manipulator wurde als SCARA-Manipulator, dessen Arbeitsraum eine Ebene parallel zum Boden der Benutzerumgebung darstellt, ausgelegt. Hierdurch ist eine Darstellung von Kräften in der xy -Ebene des Raums möglich. Für den SCARA-Manipulator wurde eine Parallel-Bauart, wie sie in Abbildung 6.2 dargestellt ist, entwickelt. Der Vorteil einer solchen Bauweise [84] besteht neben der größeren Steifigkeit darin, dass die Antriebe in die Basis des Manipulators verlagert werden und damit die bewegte Masse verringert wird. Hierdurch erhält das System eine deutlich höhere Agilität.

Ein Problem bei herkömmlichen Antrieben ist der eingeschränkte Bewegungsraum der Gelenke. Da aber für die SMHI ein unendlicher rotatorischer Freiheitsgrad um die Raumsenkrechte benötigt wird, musste ein alternatives Konzept gefunden werden. Der unendliche rotatorische Freiheitsgrad wird dadurch ermöglicht, dass die inneren Schenkel des Parallel-SCARA durch angetriebene Ringläufe ersetzt wurden. Diese Antriebe haben keinen Anschlag. Ein zusätzlicher Knick in den äußeren Schenkeln, der aber die Kinematik des Systems nicht beeinflusst, erlaubt eine Bewegung um die z -Achse des Linearsystems herum. So kann der gesamte Konfigurationsraum ausgenutzt und dadurch der Arbeitsraum maximiert werden.

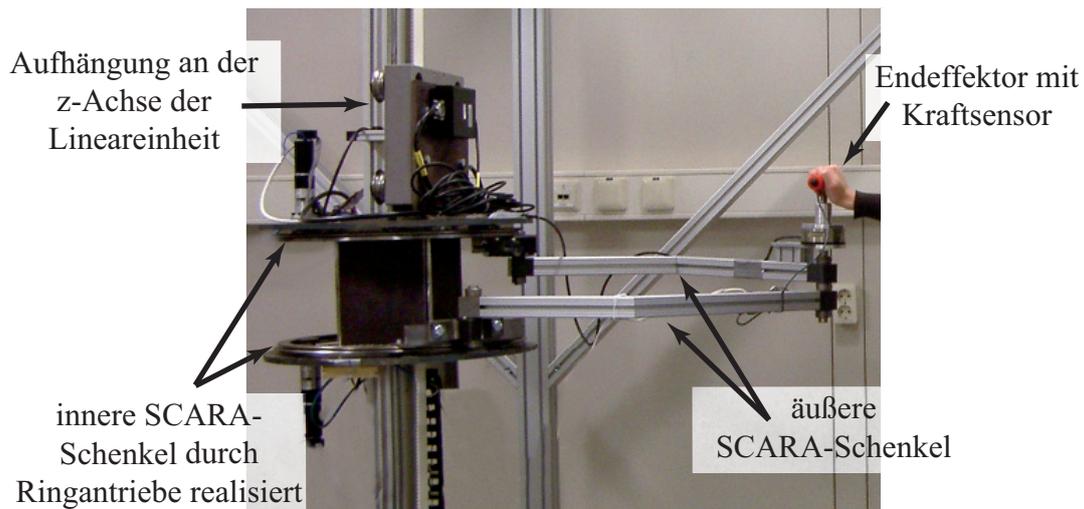


Abbildung 6.2: Haptischer Manipulator in Parallel-SCARA-Bauweise. Die inneren Schenkel des Parallel-SCARA wurden durch Ringantriebe ersetzt, so dass ein unendlicher rotatorischer Freiheitsgrad zur Verfügung steht. Die abgelenkten äußeren Schenkel vermeiden Kollisionen mit der Basis beim Anfahren extremer Positionen.

6.2 Kinematik der SMHI

Um das in Abschnitt 5.3 beschriebene Regelungskonzept auf die konkrete Realisierung aus diesem Kapitel anwenden zu können, werden natürlich die Kinematikgleichungen der SMHI benötigt. Diese sollen anhand des in Abbildung 6.3 dargestellten Schemas des Gesamtsystems hergeleitet werden.

Die lineare Vorpositioniereinheit besteht aus den drei translatorischen Antrieben t_1 , t_2 und t_3 . Die beiden aktiv angetriebenen rotatorischen Gelenke des haptischen Manipulators r_1 und r_2 wurden so an der Basis angebracht, dass sie um eine gemeinsame Achse rotieren. Die weiteren rotatorischen Gelenke der Parallel-SCARA-Kinematik p_1 , p_2 und p_3 sind passiv. Ihre Stellung ist eindeutig durch die Stellung von r_1 und r_2 bestimmt.

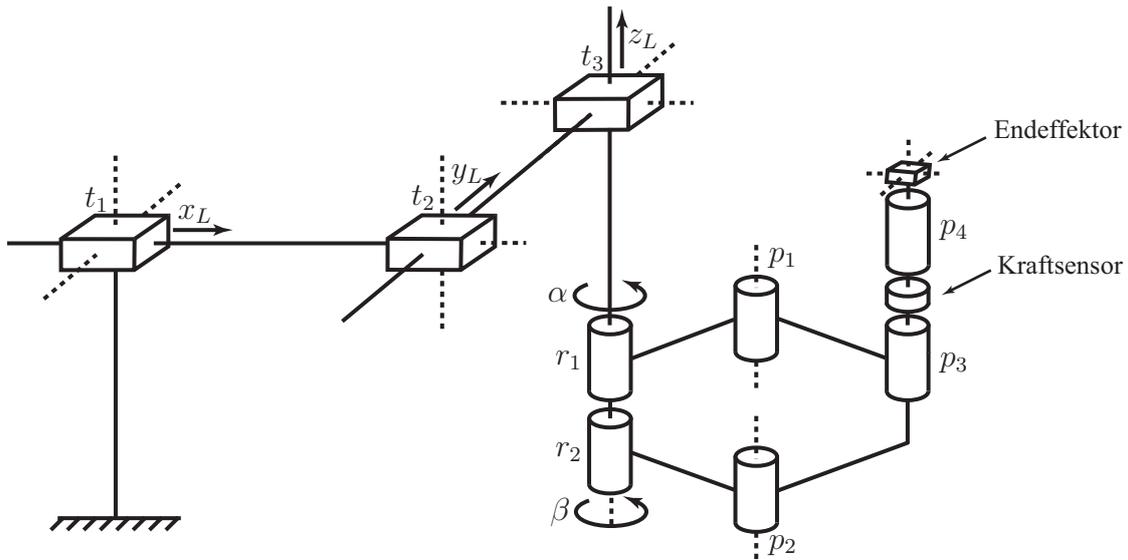


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der kinematischen Kette der SMHI.

Jenseits von p_3 ist der Kraftsensor fest mit einem der beiden SCARA-Arme verbunden. Würde man direkt auf dem Kraftsensor den Endeffektor, d. h. den Handgriff für den Benutzer, anbringen, würde dieser, als Zwangsbedingung aus den erwünschten translatorischen Bewegungen, auch immer eine rotatorische Bewegung vollziehen. Hierdurch würden dem Benutzer aber immer unerwünschte Momente dargestellt. Um dies zu vermeiden, ist der Endeffektor über ein weiteres passives rotatorisches Gelenk p_4 mit dem Kraftsensor verbunden.

Ein entscheidender Faktor zur Vereinfachung des kinematischen Modells ist eine geschickte Wahl der Koordinatensysteme S_B , S_L und S_E . Abbildung 6.4 zeigt, wie die Koordinatensysteme für das vorliegende System gewählt wurden. Das Basiskoordinatensystem S_B entspricht dem Ursprungs koordinatensystem $S_{O,U}$ der Benutzerumgebung, wie es in den Kapiteln 3 und 4 verwendet wurde. Das heißt, der Ursprung wurde in der Mitte der Benutzerumgebung auf dem Boden festgelegt. Die Koordinatenachsen verlaufen parallel zu den translatorischen Antrieben t_1 , t_2 und t_3 . Hierdurch wird erreicht, dass der Konfigurationsraum der Vorpositioniereinheit

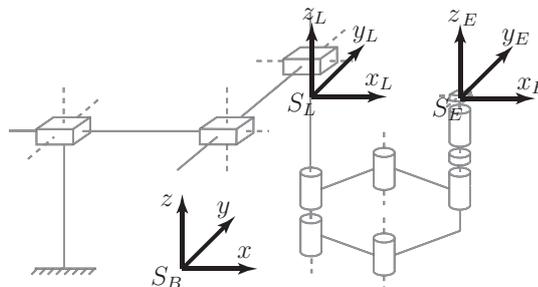


Abbildung 6.4: Wahl der für die Regelung der SMHI bedeutenden Koordinatensysteme.

dem Arbeitsraum entspricht. Die Vorpositioniereinheit lässt sich also direkt in kartesischen Koordinaten $\underline{x}_L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}$ regeln.

Das Manipulatorfuß-Koordinatensystem S_L ist dementsprechend durch die Transformation

$${}^B\mathbf{T}_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_L \\ 0 & 1 & 0 & y_L \\ 0 & 0 & 1 & z_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

abhängig vom Basiskoordinatensystem gegeben. $z_L = 0$ wurde so gewählt, dass es auf einer Höhe mit dem Endeffektor-Koordinatensystem liegt.

Mit der Transformation

$${}^L\mathbf{T}_E = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & x_S \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & y_S \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

lässt sich die kinematische Kette aus Gleichung (5.1) bis zum Endeffektor vervollständigen, wobei sich x_S , y_S und ϕ wie weiter unten gezeigt aus der Stellung der Gelenke r_1 und r_2 berechnen lassen.

Da bei vorliegendem System die Rotationen nur von geringer Bedeutung²⁷ sind, lässt sich die Endeffektorposition nur unter Betrachtung der translatorischen Freiheitsgrade auch als

$$\underline{x}_E = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

darstellen.

Nach Gleichung (6.3) ist die z -Achse der SMHI also nicht redundant ausgelegt, weshalb für sie haptische Darstellung und Vorpositionierung nicht getrennt werden können. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur noch die Regelung in der xy -Ebene betrachtet. Der Vollständigkeit halber wird aber in Abschnitt 6.5 auch eine mögliche Lösung für die Regelung der z -Achse kurz dargestellt.

Um das vollständige kinematische Modell zu erhalten, muss nur noch $[x_S \ y_S]^T$ in Abhängigkeit der Manipulatorkonfiguration $\underline{\gamma} = [\alpha \ \beta]^T$ bestimmt werden. Hierzu wird die in Abbildung 6.5 dargestellte Projektion der Parallel-SCARA-Kinematik auf die xy -Ebene betrachtet.

Die beiden aktiv angetriebenen Gelenke r_1 und r_2 befinden sich dann im Ursprung des Manipulatorfuß-Koordinatensystems. Die Winkel α und β stellen die Konfiguration des Gelenks r_1

²⁷ Der einzige rotatorische Freiheitsgrad ϕ in Gleichung (5.1) ist durch Zwangsbedingungen von $[x_S \ y_S]^T$ abhängig. Außerdem fällt er durch das passive rotatorische Gelenk p_4 vor dem Endeffektor regelungstechnisch nicht ins Gewicht.

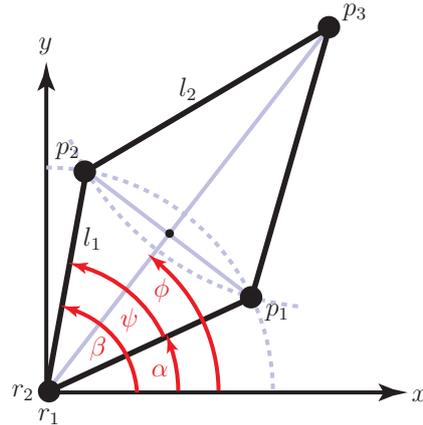


Abbildung 6.5: Projektion des Parallel-SCARA-Manipulators zur Herleitung der kinematischen Gleichung.

bzw. r_2 dar. Die Länge l_1 der inneren Schenkel entspricht dem Radius der Ringantriebe und die Länge l_2 der äußeren Schenkel dem Abstand zwischen dem passiven Gelenk p_1 bzw. p_2 und der Endeffektorposition p_3 . Aus kinematischer Sicht kann hier die abgeknickte Form des äußeren Schenkels vernachlässigt werden.

Mit der Konvention, dass stets $\alpha \leq \beta$, lässt sich $[x_S \ y_S]^T$ eindeutig als

$$\underline{x}_S = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \left(l_1 \cdot \cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)} \right) \\ \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \left(l_1 \cdot \cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)} \right) \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

bestimmen. Damit ist die Vorwärtskinematik der SMHI vollständig bestimmt. Basierend auf dieser kinematischen Gleichung soll in den folgenden Abschnitten die Regelung der SMHI ausgearbeitet werden.

6.3 Kraftregelung für den haptischen Manipulator

Das Ziel der Kraftregelung ist es, am Endeffektor des haptischen Manipulators eine definierte Kraft darzustellen. Hierzu müssen die Antriebe ein von der Kinematik des Systems abhängiges Moment aufbringen.

Der Zusammenhang zwischen dem Kraftvektor am Endeffektor $\hat{\underline{F}} = [\hat{F}_x \ \hat{F}_y]^T$ und dem Momentvektor an den aktiven rotatorischen Gelenken $\underline{\tau} = [M_\alpha \ M_\beta]^T$ lässt sich für den stationären Fall mit Hilfe der konfigurationsabhängigen Jacobi-Matrix der Kinematikgleichung

$\mathbf{J}(\underline{\gamma}) = \frac{\partial \underline{x}_s(\underline{\gamma})}{\partial \underline{\gamma}}$ bestimmen. Die Komponenten von $\mathbf{J}(\underline{\gamma})$ lauten dabei im Einzelnen:

$$\frac{\partial x_S}{\partial \alpha} = \frac{l_1^2 \left(-\sin\left(\frac{3\alpha+\beta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \right) - \sqrt{2}l_1 \sqrt{-l_1^2 + 2l_2^2 + l_1^2 \cos(\alpha - \beta)} \sin(\alpha) - 2l_2^2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}{4\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}} , \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial x_S}{\partial \beta} = \frac{l_1^2 \left(\sin\left(\frac{\alpha-3\beta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \right) - \sqrt{2}l_1 \sqrt{-l_1^2 + 2l_2^2 + l_1^2 \cos(\alpha - \beta)} \sin(\beta) - 2l_2^2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}{4\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}} , \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial y_S}{\partial \alpha} = \frac{l_1^2 \left(\cos\left(\frac{3\alpha-\beta}{2}\right) - \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \right) + \sqrt{2}l_1 \sqrt{-l_1^2 + 2l_2^2 + l_1^2 \cos(\alpha - \beta)} \cos(\alpha) + 2l_2^2 \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}{4\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}} \quad (6.7)$$

und

$$\frac{\partial y_S}{\partial \beta} = \frac{l_1^2 \left(\cos\left(\frac{\alpha-3\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \right) + \sqrt{2}l_1 \sqrt{-l_1^2 + 2l_2^2 + l_1^2 \cos(\alpha - \beta)} \cos(\beta) + 2l_2^2 \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}{4\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}} . \quad (6.8)$$

Im für die Regelung interessanten Fall müssen die aufzubringenden Motormomente $\underline{\tau}_{out}$ in Abhängigkeit einer am Endeffektor aufzubringenden Sollkraft \underline{F}_{soll} bestimmt werden.

Diese erhält man durch Betrachtung von $\mathbf{J}(\underline{\gamma})$ am Arbeitspunkt $\underline{\gamma}_0$ und Auflösen nach $\underline{\tau}$ als

$$\underline{\tau} = \mathbf{J}^T(\underline{\gamma}) \Big|_{\underline{\gamma}_0} \underline{F}_{soll} . \quad (6.9)$$

Wie schon zuvor beschrieben, gilt der Zusammenhang aus Gleichung (6.9) nur im stationären Fall. Hinzu kommt, dass die Gleichstrommotoren des haptischen Manipulators mit einer zum Moment τ proportionalen Spannung $U = c \cdot \tau_{out}$ angesteuert werden. Dieses Modell ist allerdings nur bedingt richtig, da das Verhalten solcher Motoren vor allem in der Anfahrtsphase üblicherweise nichtlinear ist.

Eine reine den obigen Zusammenhängen entsprechende Steuerung würde also in einer stark von der Sollkraft abweichenden Kraft am Endeffektor resultieren. Da dies aber nicht erwünscht sein kann, wird das beschriebene Modell in einen Regelkreis integriert. Ein einfaches Gesetz zur Kraftregelung mit Vorsteuerung ist z. B. durch

$$\underline{\tau}_{out} = \mathbf{J}^T(\underline{\gamma}) \Big|_{\underline{\gamma}_0} \left(\underline{F}_{soll} + K_{PID}(\hat{\underline{F}} - \underline{F}_{soll}) \right) \quad (6.10)$$

gegeben, wobei K_{PID} einen linearen Regler, z. B. einen PID-Regler darstellt. Das Regelgesetz lässt sich unter Verwendung der Linearität aller Komponenten zu

$$\begin{aligned} \underline{\tau}_{out} &= \mathbf{J}^T \underline{F}_{soll} + K_{PID}(\mathbf{J}^T \hat{\underline{F}} - \mathbf{J}^T \underline{F}_{soll}) \\ &= \underline{\tau}_{soll} + K_{PID}(\underline{\tau} - \underline{\tau}_{soll}) \end{aligned} \quad (6.11)$$

umformen, wobei für $\mathbf{J}^T(\underline{\gamma})\big|_{\underline{\gamma}_0}$ die verkürzte Darstellung \mathbf{J}^T verwendet wurde. Diese Darstellung führt in der Anwendung zu besseren Ergebnissen. Die Reglerparameter aus K_{PID} lassen sich mit den Standardverfahren, z. B. Ziegler-Nichols [30], bestimmen. Das Vorgehen hierbei ist in [120] detailliert beschrieben.

6.4 Optimale Vorpositionierung

Für die optimale Positionierung der Lineareinheit muss nach Abschnitt 5.4 die optimale SCARA-Konfiguration $\underline{\gamma}^*$ gefunden werden. Hierfür wird zunächst die Manipulierbarkeit optimiert. Es wird sich aber zeigen, dass hierdurch für das vorliegende System keine eindeutige Lösung gefunden wird, und dass ein weiteres Optimierungskriterium hinzugezogen werden muss.

6.4.1 Optimierung der Manipulierbarkeit

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.4 ist die Manipulierbarkeit des SCARA-Manipulators in einer bestimmten Konfiguration $\underline{\gamma}$ durch die Singulärwerte $\sigma_1(\underline{\gamma})$ und $\sigma_2(\underline{\gamma})$ der Jacobi-Matrix \mathbf{J} aus Gleichung (6.5)–(6.8) als

$$w(\underline{\gamma}) = \sigma_1(\underline{\gamma}) \cdot \sigma_2(\underline{\gamma}) \quad (6.12)$$

gegeben.

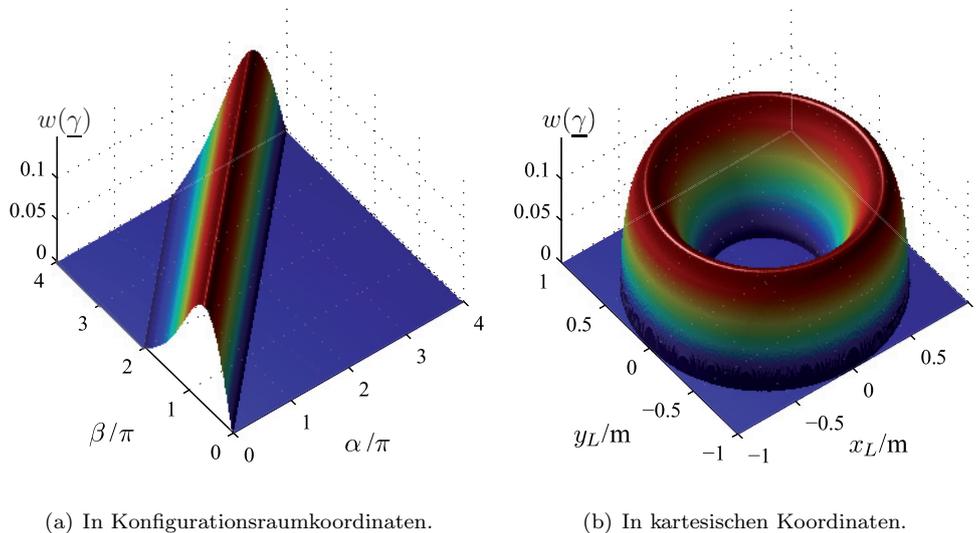


Abbildung 6.6: Die Manipulierbarkeit w des SCARA-Manipulators. An Stellen außerhalb des Arbeitsbereichs wurde für w der Wert 0 angenommen.

Nach Einsetzen der Segmentlängen des realen Systems $l_1 = 0,285$ m und $l_2 = 0,708$ m und Maximierung nach

$$\underline{\gamma}^* = \arg \max_{\underline{\gamma}} (w(\underline{\gamma})) \quad (6.13)$$

findet man, wie in Abbildung 6.6(a) das Optimum bei $\beta - \alpha = 2,048$. Statt einer optimalen Konfiguration $\underline{\gamma}^*$ erhält man also nur ein Optimum

$$\psi^* = 2,048 \quad (6.14)$$

für den SCARA-Öffnungswinkel $\psi = \beta - \alpha$.

6.4.2 Maximierung der Bewegungsfreiheit des Benutzers

Die Form von $w(\underline{\gamma})$ in kartesischen Koordinaten (Abbildung 6.6(b)) legt nahe, das Vorpositionierungsproblem zur genaueren Analyse in Polarkoordinaten zu betrachten. Die Polarkoordinatendarstellung $\underline{x}_S^P = [r \ \phi]^T$ von \underline{x}_S kann leicht auf die Konfiguration $\underline{\gamma}$ zurückgeführt werden. Hierbei ist

$$\phi = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (6.15)$$

und

$$r = l_1 \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \quad (6.16)$$

wobei $\psi = \beta - \alpha$ ist.

Da $w(\underline{\gamma})$ offensichtlich unabhängig von ϕ ist, muss ein weiteres Kriterium gefunden werden, nach dem ϕ optimiert werden kann. Mit Blick auf die Anwendung ist also ϕ so zu wählen, dass der Benutzer in seiner Bewegungsfreiheit am wenigsten eingeschränkt wird. Das ist genau dann erreicht, wenn der Abstand d zwischen seiner Körpersenkrechten, hier durch die Kopfposition \underline{x}_H angenähert, und dem Manipulatorfußpunkt \underline{x}_L bei gegebenem r aus Gleichung (6.16) maximal ist.

Wie in Abbildung 6.7 dargestellt, ist durch $\delta = \sqrt{(x_H - x_E)^2 + (y_H - y_E)^2}$ der Abstand zwischen dem Endeffektor des Manipulators \underline{x}_E und der Kopfposition \underline{x}_H des Benutzers gegeben. Der Winkel, den die Verbindungslinie zwischen \underline{x}_E und \underline{x}_H mit der x -Achse des Koordinatensystems bildet, lässt sich als $\theta = \text{atan2}(y_H - y_E, x_H - x_E)$ berechnen. Nach dem Kosinussatz ist dann

$$d^2 = r^2 + \delta^2 - 2r\delta \cos(\phi - \theta + \pi). \quad (6.17)$$

Erwartungsgemäß ist d maximal, wenn $\cos(\phi - \theta + \pi) = -1$, was für $\phi^* = \theta$ der Fall ist, d. h. wenn die Verbindung zwischen Manipulatorfußpunkt und Endeffektor in einer Linie mit der Verbindung zwischen Endeffektor und Kopf des Benutzers liegt.

Insgesamt ist die optimale Konfiguration $\underline{\gamma}^*$ also durch

$$\alpha^* = \phi^* + \frac{\psi^*}{2} \quad \text{und} \quad \beta^* = \phi^* - \frac{\psi^*}{2} \quad (6.18)$$

gegeben.

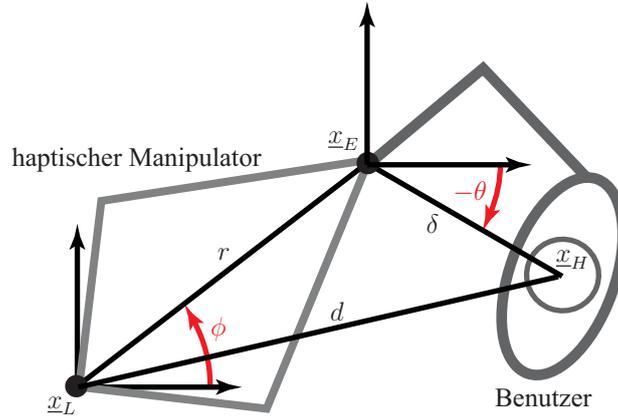


Abbildung 6.7: Der Abstand d zwischen dem Benutzer und dem Linearsystem ist abhängig vom Winkel ϕ .

6.5 Admittanzregelung für die z-Achse

Wie schon zuvor beschrieben, nimmt die z -Achse eine Sonderrolle ein, da sie nicht redundant ausgelegt ist. Die Kraftdarstellung entlang der z -Achse muss also von der z -Achse des Linearsystems, die konzeptionell zur Vorpositioniereinheit gehört, durchgeführt werden. Dazu soll hier ein einfacher Admittanzregler vorgestellt werden, der eine Geschwindigkeitsregelung auf Basis der z -Komponente der Sollkraft $F_{z,soll}$ und der am Endeffektor gemessenen Kraft \hat{F}_z realisiert.

Ein einfaches Modell für den Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung ist durch

$$F = m \cdot \ddot{x} \quad (6.19)$$

gegeben, wobei m die Masse des Endeffektors darstellt. Entsprechend stellt

$$\ddot{x} = \frac{F}{m} \quad (6.20)$$

ein Modell für die Admittanz dar.

Die durch Vernachlässigung der Dämpfung entstehenden Fehler werden durch Einsatz eines Reglers behoben. Die Sollbeschleunigung der z -Achse des Linearsystems kann dementsprechend, wie in Abbildung 6.8 gezeigt, durch

$$\ddot{z}_{L,soll,k} = \frac{1}{m} \cdot K_{PID} (F_{z,soll} - \hat{F}_z) \quad (6.21)$$

bestimmt werden. Die Sollgeschwindigkeit $\dot{z}_{L,soll,k}$ für die unterlagerte Geschwindigkeitsregelung der z -Achse erhält man durch diskrete Integration

$$\dot{z}_{L,soll,k} = \dot{z}_{L,soll,k-1} + T \cdot \ddot{z}_{L,soll,k-1} \quad (6.22)$$

wobei T das Zeitintervall darstellt. Bei einer Regelung mit einer Taktrate von 1 kHz gilt also $T = 0.001$ s.

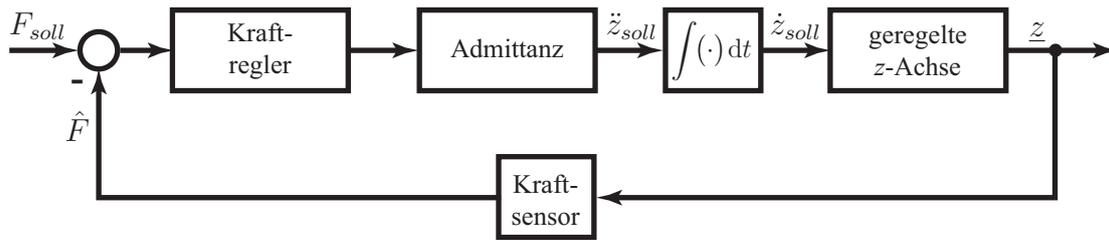


Abbildung 6.8: Admittanzregelung für die nicht-redundant ausgelegte z -Achse.

6.6 Konzeption einer verteilten Steuerungselektronik für SMHI

Eine haptische Schnittstelle von der Größe des hier beschriebenen Systems stellt nicht nur an die Regelungsalgorithmen ganz besondere Herausforderungen. Es musste auch eine integrierte Steuerungselektronik entwickelt werden, die es erlaubt, die mehrere Meter auseinander liegenden Sensoren und Aktoren des Systems koordiniert anzusteuern. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass für eine gute haptische Darstellung eine Taktrate von 1000 Hz benötigt wird. Das heißt die Zykluszeit, die ein Auslesen sämtlicher Sensoren, die Berechnung der neuen Steuersignale und die Ansteuerung der Antriebe umfasst, muss unter 1 ms liegen.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte verteilte Steuerungselektronik erfüllt die Anforderungen an den Einsatz bei der Regelung der SMHI, sie ist allerdings durch ihr modulares Konzept von größerer Allgemeinheit und lässt sich für die Regelung nahezu beliebiger großer Robotersysteme einsetzen.

6.6.1 Elektronikkomponenten

Die Ansteuerungselektronik besteht aus zwei verschiedenen Typen von Knoten, die über Profibus²⁸ miteinander verbunden sind, da dieser eine hohe Datenrate auch bei großen Kabellängen erlaubt. Eine Konfiguration besteht dabei aus einem *Masterknoten* und mehreren *Slaveknoten*²⁹.

Der Masterknoten ist mit einem DSP ausgestattet und hat entsprechend viel Rechenleistung. Seine Aufgabe ist die Regelung der gesamten haptischen Schnittstelle und die Kommunikation mit den anderen Komponenten des Telepräsenzsystems.

Die Aufgabe der Slaveknoten, die mit einem Mikrocontroller mit deutlich weniger Rechenleistung ausgestattet sind, besteht in der Anbindung der verschiedenen Sensor- und Aktorkomponenten der haptischen Schnittstelle. Sie sind meist dezentral in der Nähe der jeweiligen Sensor- bzw. Aktoreinheit untergebracht. Bei den Slaveknoten handelt es sich um Einheitsknoten, die durch spezielle Adapterplatinen, die zusätzliche Elemente wie Analog-Digital-Wandler oder Operationsverstärker tragen, und durch spezielle Software an ihre Rolle angepasst werden

²⁸ <http://www.de.profibus.com/>

²⁹ Die Anzahl der verwendeten Slaveknoten und die Länge der zwischen den Knoten ausgetauschten Datenpakete bestimmt im wesentlichen die Zykluszeit.

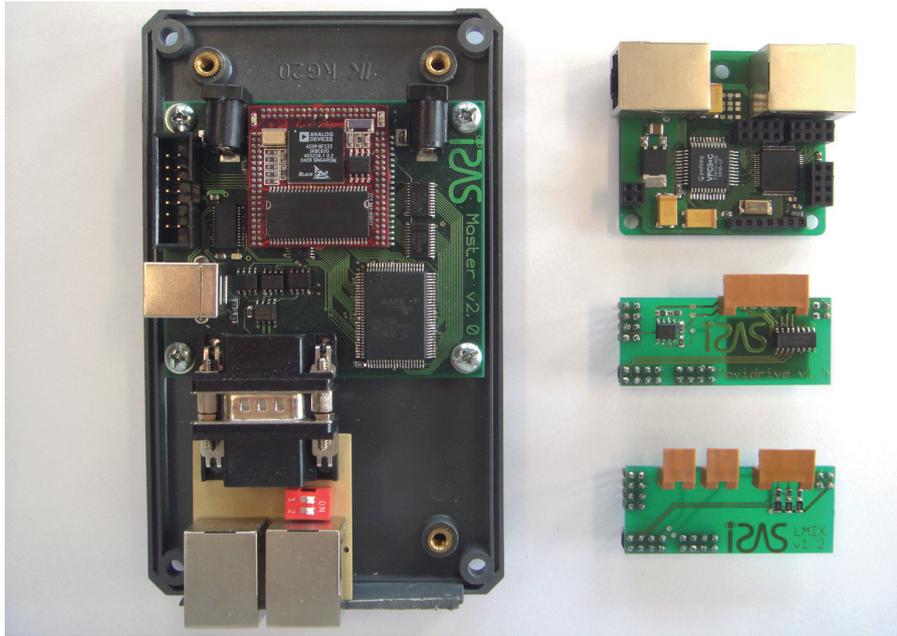


Abbildung 6.9: Die für die Regelung der SMHI entwickelten Elektronikkomponenten. Abgebildet sind der Masterknoten (links), ein Slaveknoten (rechts oben) und zwei verschiedene Adapterplatinen (rechts unten).

können. Bei Sensoreinheiten besteht diese Rolle üblicherweise in der Vorverarbeitung des Sensorsignals, bei Aktoreinheiten in der Generierung eines analogen oder digitalen Ansteuersignals. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, auf einem Slaveknoten einen unterlagerten Regelkreis zu implementieren, wenn ein Aktor und der zugehörige Sensor an diesen Knoten angeschlossen sind. Bei den in Abbildung 6.9 dargestellten Elektronikkomponenten handelt es sich um eine Weiterentwicklung des in [118] ausführlich beschriebenen Konzepts.

In einer typischen Anwendung verwendet man eine Konfiguration, wie sie in Abbildung 6.10 dargestellt ist. Der Masterknoten kommuniziert mit den Slaveknoten in einer festen Taktrate von 1000 Hz über Profibus. Dabei werden an alle Aktoreinheiten die aktuellen Steuerkommandos geschickt. Von den an Sensoreinheiten angeschlossenen Slaveknoten erhält der Masterknoten im Gegenzug die aktuellen Sensorwerte. Auf Basis dieser Sensorwerte werden, wie in den Abschnitten 6.3 bis 6.5 beschrieben, die neuen Steuerkommandos und die aktuelle Endeffektorlage berechnet.

Die Verbindung zum Telepräsenzsystem wird durch einen PC hergestellt, mit dem der Master über USB verbunden ist. Dieser verbindet sich mit der in Abschnitt 7.1 beschriebenen modularen Telepräsenzsoftware und ermöglicht so den Datenaustausch zwischen Telepräsenzsystem und haptischer Schnittstelle.

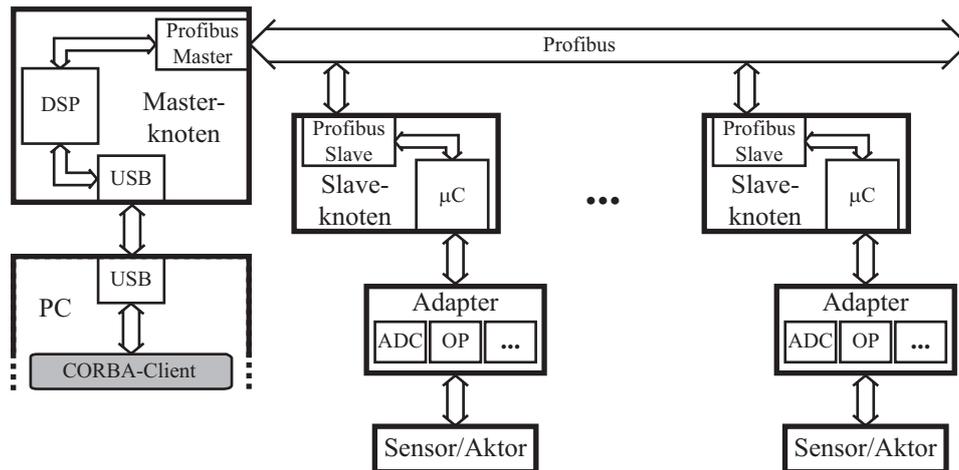


Abbildung 6.10: Datenlogistische Sicht auf die zur Steuerung der SMHI eingesetzten elektronischen Komponenten.

6.6.2 Sicherheitskonzept

Da der Benutzer bei der Bedienung einer haptischen Schnittstelle in direktem Kontakt mit einem Robotersystem steht, ist ein Sicherheitskonzept vonnöten, das dafür sorgt, dass der Benutzer im Fehlerfall nicht zu Schaden kommt. Aus diesem Grund wurde in die Soft- und Hardwarekomponenten eine dreistufige Sicherheitsarchitektur, wie sie in [113] und [123] beschrieben ist, integriert.

Die höchste Ebene ist dabei die *externe Ebene*. Diese Ebene erlaubt es, sämtliche Funktionen der haptischen Schnittstelle augenblicklich zu unterbrechen. Ausgelöst durch Notausschalter und einen sogenannten Totmannschalter am Endeffektor wird das Notausprogramm sämtlicher Aktoren ausgelöst. Hierzu gehört z. B. das Feststellen der Bremsen des Linearsystems, so dass keine Bewegung mehr möglich ist.

Auf der zweiten Ebene, der *Interknotenebene*, überwachen sich die Knoten der Steuerungselektronik gegenseitig. Der Masterknoten überprüft ständig, ob noch alle Slaveknoten funktionieren. Sollte er innerhalb einer vorgegebenen Zeit keine Antwort auf seine Anfragen erhalten, wird ein Nothalt ausgelöst. Um auch für den Fall eines Masterausfalls gerüstet zu sein, halten die Slaveknoten die an sie angeschlossenen Aktoren auch dann an, wenn sie innerhalb der vorgegebenen Zeit keine neuen Daten vom Master erhalten.

Auf der tiefsten Ebene, der *Intraknotenebene*, überwachen sich die Komponenten jedes Knotens selbst und gegenseitig unter Verwendung ihrer sogenannten Watchdogtimers. Im Fall einer Fehlfunktion wird der Knoten komplett angehalten und der Fehler über die Interknotenebene weiterpropagiert.

6.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die prototypische Realisierung einer semi-mobilen haptischen Schnittstelle entwickelt. Basierend auf den gewählten mechanischen Lösungen für die beiden Subsysteme wurde zunächst ein kinematisches Modell erstellt, das anschließend als Grundlage für die Herleitung der Kraftregelung des haptischen Manipulators diente.

Die optimale Vorpositioniereinheit folgt zwei Optimierungskriterien. Der SCARA-Öffnungswinkel wird anhand der optimalen Manipulierbarkeit bestimmt. Da von der Manipulierbarkeit keine Rückschlüsse auf die SCARA-Orientierung getroffen werden können, wurde hierfür mit der Maximierung der Bewegungsfreiheit des Benutzers ein neues Paradigma gefunden. Dementsprechend wird die SCARA-Orientierung so gewählt, dass der Abstand zwischen Vorpositioniereinheit und Benutzer stets maximal ist.

Um die vorgestellten Regelungsalgorithmen in hoher Taktrate direkt auf dem System auszuführen, wurde eine verteilte Steuerungselektronik entworfen. Zu ihren Vorzügen zählen die Anpassungsmöglichkeiten an geänderte Hardwarekonfiguration und die aus einer dezentralen Vorverarbeitung der Daten resultierende Abstraktion von speziellen Sensor- bzw. Aktortypen.

Details der Realisierung in Hard- und Software

Bei der Realisierung eines Telepräsenzsystems müssen neben den Lösungen für grundlegende Probleme, wie das Ermöglichen weiträumiger Bewegung und die haptische Interaktion, auch viele Detaillösungen gefunden werden. Da diese Detaillösungen den Aufbau eines solchen Systems überhaupt erst ermöglichen und deshalb auch von allgemeinerem Interesse sind, sollen sie in diesem Kapitel vorgestellt werden.

7.1 Modulare Softwarearchitektur

Ein Ziel beim Aufbau des Telepräsenzsystems war, möglichst viele Anwendungsfälle abzudecken und dabei das System einfach erweiterbar zu halten. Aus diesem Grund wurde eine modulare Softwarelösung [124] mit fest definierten Schnittstellen erstellt, so dass die einzelnen beteiligten Komponenten zur Laufzeit ausgewählt werden können. Da diese Software-Schnittstellen mit der CORBA-Middleware³⁰ umgesetzt werden, ist das Zusammenspiel zwischen den Komponenten unabhängig von ihrer jeweiligen Implementierung und der Verteilung auf physikalische Einheiten.

Telepräsenz-Server

Die zentrale Einheit der in *Client-Server-Struktur* umgesetzten Software ist dabei, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, der *Telepräsenz-Server*. Er stellt zwei Schnittstellen zur Verfügung, die Benutzerumgebungs-Schnittstelle, mit der sich alle Komponenten der Benutzerumgebung verbinden, und die Zielumgebungs-Schnittstelle, die für die Kommunikation mit den Komponenten der Zielumgebung verantwortlich ist.

Der Transport sämtlicher parametrischer Daten (Kopf- und Handlage, Kraftvektoren, Fingerstellungen, etc.) zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt über den Telepräsenz-Server. Dabei werden diese Daten zwischen Benutzer- und Zielumgebung gegebenenfalls durch die Bewegungskompression modifiziert, die in Form einer asynchronen Implementierung Teil des Servers ist. Welche Implementierungen der Bewegungskompressionsmodule zum Einsatz kommen,

³⁰ <http://www.corba.org>

oder ob die Bewegungskompression überhaupt verwendet wird, ist natürlich auch konfigurierbar und lässt sich so auf den konkreten Anwendungsfall anpassen.

Die einzigen Daten, die nicht über den Telepräsenz-Server vermittelt werden, sind breitbandige Streaming-Daten wie Audio- und Videodaten. Diese werden nicht durch die Bewegungskompression beeinflusst und werden deshalb aus Performanzgründen direkt zwischen den beteiligten Komponenten ausgetauscht.

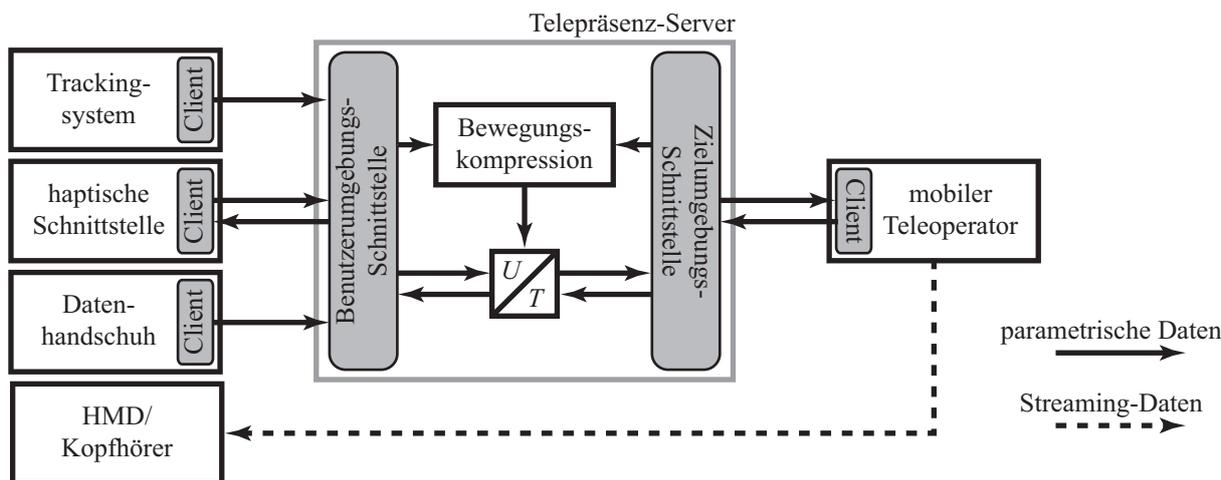


Abbildung 7.1: Datenströme zwischen den Modulen bei einer beispielhaften Konfiguration der Telepräsenzumgebung.

Client-Komponenten

Die einzelnen Komponenten der Benutzer- und Zielumgebung sind zumeist kombinierte Hard- und Softwareeinheiten, die bestimmte Fähigkeiten implementieren, wie z. B. Tracking des Benutzers [125]. Es sind aber auch reine Softwarekomponenten, wie z. B. virtuelle Zielumgebungen, möglich. Alle Client-Komponenten haben gemeinsam, dass sie die jeweilige Client-Schnittstelle aus der Benutzer- bzw. Zielumgebung implementieren, über die sie mit dem Telepräsenz-Server und den anderen Client-Komponenten kommunizieren.

Die Kommunikation zwischen Client und Server folgt dabei dem *Push-Pull-Prinzip*, d. h. Clients senden zur Verfügung stehende Daten unaufgefordert an den Telepräsenz-Server und fordern benötigte Daten von ihm an. Die Kommunikation wird nie vom Server initiiert. Durch dieses Kommunikationsmodell benötigt der Server keinerlei Informationen über die angeschlossenen Clients, so dass es Dritten möglich ist, eigene Telepräsenzscenarien unter Verwendung von bestehenden und neu entwickelten Komponenten zu realisieren [93], ohne dabei in den Server eingreifen zu müssen.

Abbildung 7.1 zeigt den Informationsfluss in einer beispielhaften Konfiguration des Telepräsenzsystems. Dabei können die Komponenten aus beiden Umgebungen als Informationsquellen

oder -senken fungieren. Dem Regelungskonzept aus Abschnitt 5.5 entsprechend werden sowohl von der haptischen Schnittstelle als auch vom mobilen Teleoperator Daten bi-direktional ausgetauscht.

7.2 Satelliten-Rechnersystem in der Benutzerumgebung

Das Satelliten-Rechnersystem, wie in Abbildung 7.2 dargestellt, ist ein leistungsfähiger Computer, der in einen Rucksack integriert wurde, so dass er vom Benutzer des Telepräsenzsystems getragen werden kann. Ursprünglich wurde der Satelliten-Rechner wegen der begrenzten Kabellänge zwischen dem Head-Mounted-Display, über das der Benutzer den visuellen Eindruck aus der Zielumgebung erhält, und dem Computer, der dieses HMD ansteuert, aufgebaut. Um den Aktionsradius des Benutzers zu vergrößern, war es also nötig, den Ansteuerrechner mit dem Benutzer zu bewegen.

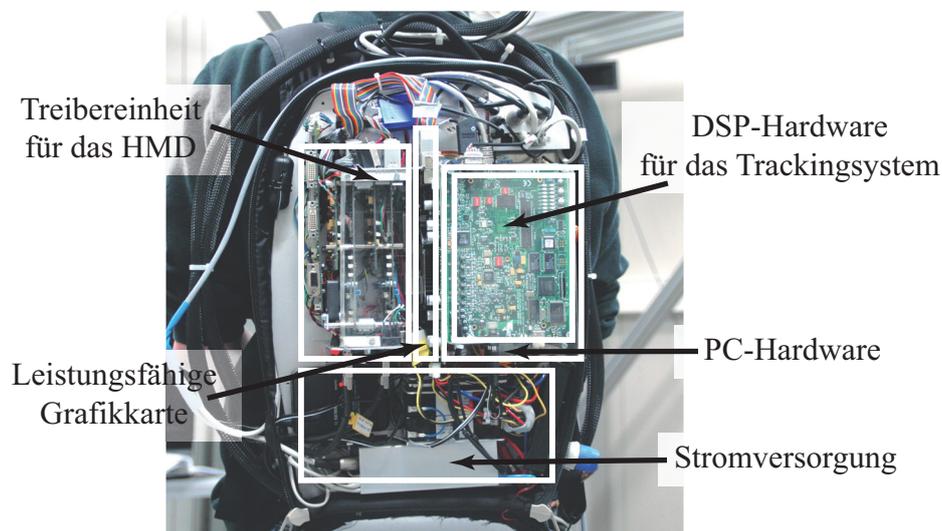


Abbildung 7.2: Der Satellitenrechner mit den darin integrierten Hardwarekomponenten.

Dieses Konzept hat sich als so geeignet für die Telepräsenz erwiesen, dass mittlerweile die meisten direkt mit dem Benutzer verbundenen Komponenten der Zielumgebung physikalisch auf dem Satelliten-Rechnersystem residieren. Die Hauptaufgabe besteht allerdings immer noch in der visuellen Darstellung der Zielumgebung. Hierfür ist im Satelliten-System neben den PC-Komponenten die Treiberhardware zur Ansteuerung des hochauflösenden HMDs enthalten. Bei realen Zielumgebungen beherbergt der Satelliten-Rechner die Empfangskomponente für die Live-Bilder aus der Zielumgebung. Bei virtuellen Zielumgebungen bietet es sich an, die komplette Zielumgebungssimulation auf dem Satelliten-Rechner auszuführen, so dass die gerenderte Ansicht der Zielumgebung direkt auf dem HMD dargestellt werden kann.

Außerdem beherbergt der Satelliten-Rechner Client und DSP-Hardware für das akustische Trackingsystem wie es in [124, 125] beschrieben wird. Die Anbindung an die anderen Komponenten des Telepräsenzsystems erfolgt kabellos über Wireless-LAN. Bei der Stromversorgung

besteht die Wahl zwischen einer kabelgebundenen Versorgung oder Batteriebetrieb, wobei sich bei Batteriebetrieb die Betriebszeit auf ungefähr 20 Minuten verkürzt.

7.3 Realisierung des mobilen Teleoperators

Während virtuelle Zielumgebungen vollständig in Software realisiert werden, muss für die Erkundung realer Zielumgebungen ein mobiler Teleoperator geschaffen werden. Neben der technischen Realisierung sind weitere Herausforderungen in diesem Zusammenhang die Regelung des Teleoperators und die Übertragung der Streaming-Daten über einen begrenzten Kanal, wie z. B. das Internet.

7.3.1 Komponenten des mobilen Teleoperators

Der mobile Teleoperator (Abbildung 7.3) besteht aus zwei Einheiten, einer mobilen Plattform und einem Schwenk-Neige-Kopf. Die mobile Plattform ist eine omnidirektionale, nicht-holonome Plattform, die auf vier einzeln angetriebenen und gelenkten Radmodulen [38] basiert. Durch diesen Aufbau erhält sie volle Flächenbeweglichkeit bei beliebiger Orientierung, was die Nachahmung realer menschlicher Trajektorien deutlich erleichtert. Auf der Plattform angebracht ist, etwa in der Höhe des Kopfs eines Menschen³¹, ein kostengünstiger Schwenk-Neige-Kopf, der durch Servo-Motoren, wie sie im Modellbau verwendet werden, angetrieben wird.

Der Schwenk-Neige-Kopf trägt das für die Aufnahme der visuellen Eindrücke der entfernten Umgebung verwendete Stereokamerasystem. Auf einen Manipulatorarm wurde zunächst verzichtet, so dass sich der mobile Teleoperator ausschließlich zur weiträumigen Exploration entfernter Umgebungen eignet. Eine Nachrüstung ist aber jederzeit möglich.

7.3.2 Regelung des Teleoperators

Für die Gesamtregelung des mobilen Teleoperators betrachtet man die mobile Plattform als atomare Einheit, deren Konfiguration durch ihre kartesischen Koordinaten $\underline{x}_P = [x_P \ y_P \ \theta_P]^T$ vollständig gegeben ist, wobei x_P und y_P die x - bzw. y -Position und θ_P die Orientierung der Plattform beschreiben. Zusammen mit den zwei Freiheitsgraden $\underline{\theta}_C = [\theta_C \ \delta_C]^T$, dem Schwenkwinkel θ_C und dem Neigungswinkel δ_C , des Schwenk-Neige-Kopfs hat der mobile Teleoperator fünf Freiheitsgrade im Konfigurationsraum. Da aber θ_P und θ_C die gleiche Rotationsachse zugrunde liegt, handelt es sich hierbei um redundante Freiheitsgrade, so dass der mobile Teleoperator im kartesischen Raum nur vier Freiheitsgrade hat.

Bei der Regelung des mobilen Teleoperators müssen die redundanten Freiheitsgrade aufgelöst werden. Dies geschieht wie in [125] anhand der unterschiedlichen Eigenschaften beider Freiheitsgrade. Die Schwenkbewegung des Kamerakopfs ist sehr schnell, allerdings auf einen Bereich

³¹ Da die Höhe nicht verstellbar ist, wird der Benutzer immer den Eindruck einer geringen Größenänderung haben.

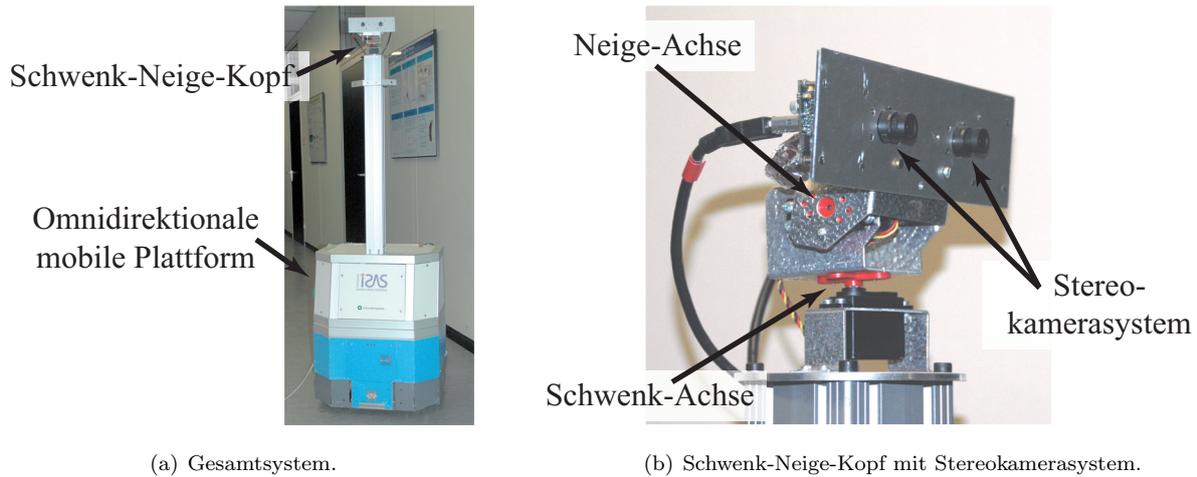


Abbildung 7.3: Der mobile Teleoperator bestehend aus einer omnidirektionalen mobilen Plattform und einem Schwenk-Neige-Kopf.

von $[-90^\circ, +90^\circ]$ beschränkt. Der rotatorische Freiheitsgrad der mobilen Plattform hingegen ist unbeschränkt. Aufgrund des Gewichts der Plattform und wegen der bisher vernachlässigten Konfigurationsänderungen der Radmodule sind sehr schnelle Orientierungsänderungen nicht, oder nur verbunden mit erheblicher Beeinträchtigung der Position der Plattform möglich.

Es ist also naheliegend, die gewünschte rotatorische Bewegung des Kopfs in der Zielumgebung frequenzabhängig auf die beiden Einheiten zu verteilen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Der vom Telepräsenz-Server bereitgestellte Sollwert $\theta_{H,soll}$ für die Orientierung des Teleoperatorkopfs im kartesischen Raum wird durch ein PT1-Glied geglättet und als Sollwert für die Orientierung an die Plattform weitergegeben. Der Sollwert für den Schwenk-Neige-Kopf

$$\theta_{C,soll} = \theta_{H,soll} - \hat{\theta}_P \quad (7.1)$$

ist durch die Differenz zwischen dem ursprünglichen Sollwert für die Orientierung und der tatsächlich gemessenen Plattformentorierung gegeben und enthält nur noch die hochfrequenten Anteile der Bewegung.

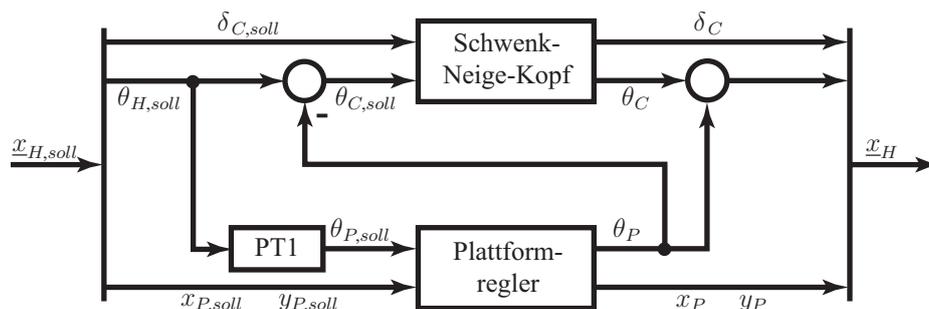


Abbildung 7.4: Auflösung der Redundanz bei der Regelung des mobilen Teleoperators.

Aufgrund der unterlagerten Radregelung der Plattform nach [81] können für die Gesamtregelung die Nichtholonomiebedingungen der Plattform vernachlässigt werden, so dass ein P-Regler zur Plattformregelung ausreicht. Für den Schwenk-Neige-Kopf kann auf eine Regelung vollständig verzichtet werden, da die verwendeten Servo-Motoren vorgegebene absolute Motorstellungsvorgaben sehr schnell und genau anfahren.

Die für die Regelung benötigte Selbstlokalisierung des Teleoperators basiert allein auf der Plattformodometrie unterstützt durch eine Gyroskopeinheit zur besseren Orientierungsschätzung. Das System ist allerdings offen für die Integration weiterer Sensoren zur Lokalisierung. So wurde die Plattform in [128] mittels einer an die Decke gerichteten Kamera anhand von Landmarken absolut lokalisiert.

7.4 Übertragung von Streaming-Daten

In Abschnitt 7.1 wurde die Übertragung parametrischer Daten ausführlich dargelegt. Auf die zweite Art von Daten, die Streaming-Daten, soll erst an dieser Stelle eingegangen werden, da sie auf Grund ihrer besonderen Anforderungen gewissermaßen das zuvor beschriebene Framework umgehen und nur in Verbindung mit einem realen Teleoperator entstehen. Streaming-Daten sind immer uni-direktional und fließen von einer Datenquelle zu einer Datensenke. Hauptsächlich dienen sie dazu, Sinneseindrücke wie Sehen und Hören von der Quelle am Teleoperator zur Senke beim Benutzer zu übertragen, allerdings ist auch die umgekehrte Richtung, z. B. bei der Sprachausgabe, möglich.

Um den Realitätsgrad des Wahrgenommenen möglichst wenig zu beeinträchtigen und damit den Präsenzeindruck zu maximieren, ist das Ziel bei der Übertragung, mit möglichst geringer Latenz qualitativ möglichst hochwertige Daten zu übertragen. Im Folgenden wird hierfür eine einheitliche Verarbeitungspipeline (Abbildung 7.5) vorgestellt, wobei sich die Umsetzung der einzelnen Verarbeitungsschritte je nach Art der Daten deutlich unterscheiden kann. Wichtig für das hier vorgestellte Konzept ist, dass die Latenz des Übertragungskanals so gering ist, dass sie vernachlässigt werden kann, oder zumindest nicht als besonders störend empfunden wird. Für den Fall eines hoch-latenten Kanals erhöht sich der Aufwand der Datenübertragung, da zur Latenzreduktion auf prädiktive Displays zurückgegriffen werden muss, wie sie z. B. für die visuelle Wahrnehmung ausführlich in [14] beschrieben wurden.

In jedem Fall ist das Nadelöhr der Übertragungskanal, üblicherweise das Internet, da dieser zumeist schmalbandiger ist als die ursprünglichen Daten. Aus diesem Grund werden die Daten nach möglichst hochqualitativer Aufnahme in analoger oder digitaler Form und gegebenenfalls nötiger Vorverarbeitung zur Datenreduktion komprimiert. Bei der Wahl der Kompression muss zwischen Qualität der komprimierten Daten, Datenmenge nach Kompression und der durch die Kompression entstehenden Latenz abgewogen werden.

Zur Übertragung über das Internet wird, wie in [3], auf das verbindungslose UDP-Protokoll zurückgegriffen, da es durch einen geringen Protokoll-Overhead eine Datenübertragung bei

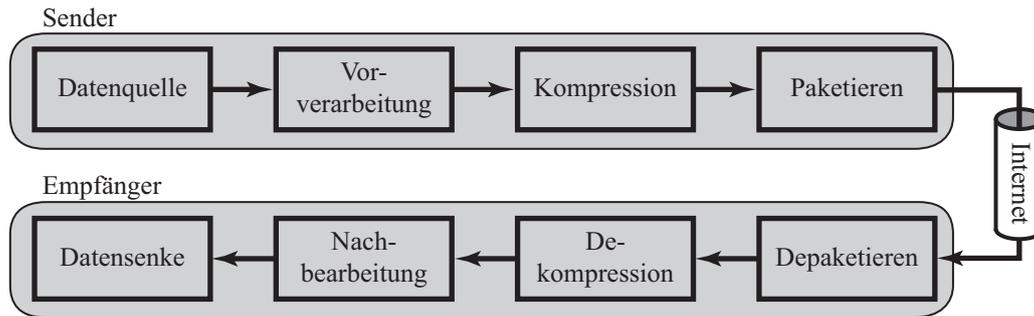


Abbildung 7.5: Verarbeitungspipeline für die Übertragung von Streaming-Daten.

geringer Latenz erlaubt. Hierzu müssen die Daten zunächst paketiert, d. h. in UDP-Pakete zerteilt werden.

Auf der Empfängerseite müssen alle Schritte der Senderseite wieder rückgängig gemacht werden. Die Daten werden depaketiert, d. h. die Nutzdaten aus den UDP-Paketen werden wieder zu den ursprünglichen Daten zusammengesetzt, dekomprimiert und nach einer eventuellen Nachbearbeitung dem Benutzer dargestellt. Wie diese Schritte konkret realisiert sind, soll im Folgenden kurz für die Übertragung von Audio- und Videodaten dargestellt werden.

Darstellung visueller Eindrücke aus der entfernten Umgebung

Zur Datenaufnahme dient ein Stereokamerasystem, das aus zwei Miniaturkameras vom Typ Firefly³² besteht, die jeweils ein Farbbild von bis zu 640×480 Bildpunkten bei einer Bildrate von bis zu 30 Hz im digitalen YUV-Format liefern. Üblicherweise wird als erster Schritt der Datenreduktion allerdings nur eine Bildgröße von 320×240 Bildpunkten verwendet. Wie in Abbildung 7.3(b) dargestellt, sind die beiden Kameras des Stereokamerasystems im Abstand von ca. 7 cm parallel angeordnet. Dies entspricht einer typischen Anordnung der Augen des Menschen bei der Betrachtung von Gegenständen im Fernfeld. Da bei der weiträumigen Erkundung von entfernten Umgebungen häufig Objekte im Abstand 2 m und mehr fixiert werden, ist diese Annäherung an die Anatomie hinreichend gut.

Bei der weiteren Verarbeitung werden je ein linkes und ein rechtes, zeitgleich aufgenommenes Bild zu einem Stereobild zusammengefasst. Hierdurch erübrigt sich eine spätere Synchronisation von linkem und rechtem Bild. Die so entstandenen Stereobilder werden mit einer schnellen JPEG-Kompression basierend auf den Intel Performance Primitives³³ komprimiert. Die Entscheidung für eine Einzelbildkompression fiel wegen der – im Gegensatz zu üblichen Videostreaming-Kompressionen nicht vorhandenen – Latenz von mehreren Bildern.

Bei der Paketierung werden die Einzelbilder auf mehrere UDP-Pakete verteilt und so identifiziert, dass bei der Depaketierung sowohl die Reihenfolge der Bilder als auch die Position des

³² <http://www.ptgrey.com>

³³ <http://support.intel.com/support/performance/tools/libraries/ipp/>

einzelnen Datenpakets innerhalb der Bilder wieder rekonstruiert werden kann. Details hierzu und zu der restlichen Verarbeitung finden sich in [115].

Vor der Darstellung auf dem HMD wird das Stereobild auf der Grafikkartenhardware auf die HMD-Auflösung von 2560×1024 Bildpunkte vergrößert, so dass die Bilder den gesamten Sichtbereich des Benutzers ausfüllen.

Stereo-Telehören

Für die Aufnahme der Audiodaten aus der entfernten Umgebung wurde ein Stereomikrofonaufbau, der in Abbildung 7.6 dargestellt ist, konzipiert. Zwei Mikrofone mit Nierencharakteristik wurden dem weit verbreiteten ORTF-System³⁴ entsprechend mit einem Abstand von 17 cm und einem Öffnungswinkel von 110° platziert. Wie in [121] gezeigt wurde, lässt sich durch einen solchen einfachen Aufbau ein dreidimensionaler Höreindruck gut darstellen.

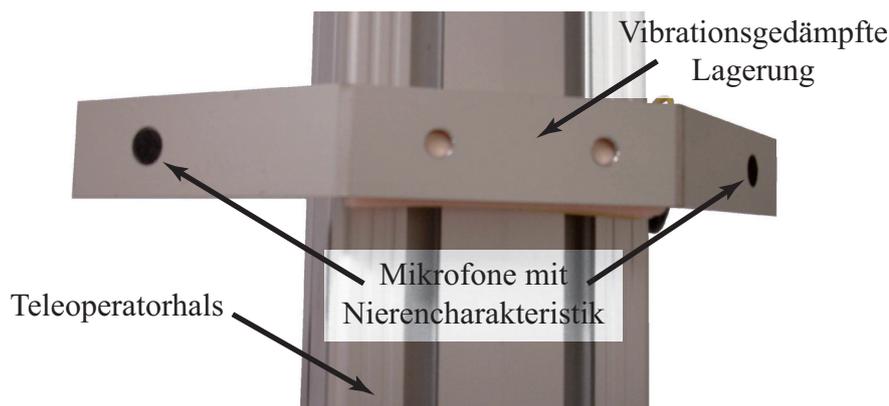


Abbildung 7.6: Das Stereomikrofonsystem am Hals des Teleoperators [121].

Die beiden Mikrofone sind über Vorverstärker an eine handelsübliche PC-Soundkarte angeschlossen, wo die Signale analog-digital-gewandelt und aufgenommen werden. Zur Komprimierung dient der für die Internettelefonie entwickelte, also für die Kompression von Sprache bei geringer Latenz optimierte Speex-Codec³⁵. Das Ergebnis der Kompression ist in sogenannten Rahmen, sehr kurzen Dateneinheiten, organisiert, so dass jeweils ein korrespondierender linker und rechter Rahmen in ein UDP-Paket verpackt und verschickt werden können. Bei der Depaketierung muss nur noch darauf geachtet werden, dass die Rahmen in richtiger Reihenfolge dargestellt werden, bzw. dass verspätete Rahmen verworfen werden. Die Darstellung erfolgt über Kopfhörer, so dass möglichst wenig Störgeräusche aus der Umgebung beim Benutzer ankommen.

³⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/ORTF-Stereosystem>

³⁵ <http://www.speex.org>

Modalität		Zielumgebung	
Aktorik	Sensorik	real	virtuell
Kopfbewegung	—	4 kartesische Freiheitsgrade (Abschnitt 7.3.2)	6 kartesische Freiheitsgrade
unbegrenzte weiträumige Bewegung	—	mit Bewegungskompression (Kapitel 3 und 4)	mit Bewegungskompression (Kapitel 3 und 4)
—	Propriozeption	durch natürliches Gehen	durch natürliches Gehen
—	Sehen	Stereo-Live-Bilder (Abschnitt 7.4)	virtuelle Stereobilder
—	Hören	Stereo-Audiostream (Abschnitt 7.4)	—
Hand- und Armbewegung	—	—*	haptische Schnittstelle dient als Eingabegerät (Abschnitt 5.3)
—	Haptik	—*	Kraftdarstellung durch haptische Schnittstelle (Kapitel 6)
Fingerbewegungen	—	—*	Eingabe mit Datenhandschuh [93]

*Der mobile Teleoperator besitzt zurzeit noch keinen Manipulatorarm.

Tabelle 7.1: Übersicht über die implementierten Modalitäten für reale und virtuelle Zielumgebungen.

7.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt die Realisierung von Soft- und Hardwarekomponenten, die zum Aufbau eines Systems zur weiträumigen Telepräsenz mit haptischer Interaktion nötig sind.

Neben dem Aufbau der haptischen Schnittstelle, der bereits in Kapitel 6 beschrieben wurde, stellt der mobile Teleoperator das zweite aufwändige System dar. Er ermöglicht durch die Kombination aus omnidirektionaler mobiler Plattform und Schwenk-Neige-Kopf die realistische Replikation der Kopfbewegungen des Benutzers und die weiträumige Erkundung realer entfernter Umgebungen. Allerdings fehlt ihm zurzeit noch ein Manipulatorarm, der eine echte Interaktion mit der realen Zielumgebung ermöglichen würde.

Das Herzstück des modularen Telepräsenzsystems ist der Telepräsenz-Server. Er vermittelt den Austausch aller parametrischer Daten zwischen allen beteiligten Komponenten, so dass das Telepräsenzsystem leicht durch neue oder anders implementierte Modalitäten erweitert werden kann.

Neben den parametrischen Daten müssen auch noch Streaming-Daten übertragen werden. Da es sich hierbei in erster Linie um Audio- und Videodaten handelt, sind sie integraler Bestandteil der audio-visuellen Schnittstelle. Alle Streaming-Daten werden nach der gleichen Verarbeitungspipeline abgearbeitet, die allerdings je nach Datentyp unterschiedlich realisiert wird.

Die zurzeit verfügbaren sensorischen und aktorischen Modalitäten sind in Tabelle 7.1 für die unterschiedlichen Zielumgebungen dargestellt. Dabei wurden diese Modalitäten teilweise auch von dritter Seite realisiert. Dies zu ermöglichen ist eine Stärke des vorgestellten Konzepts. Eine weitere Stärke besteht in der Möglichkeit zur Laufzeit die Komponenten auszuwählen, die für ein bestimmtes Setup benötigt werden, ohne dass hierfür eine Programmänderung nötig wird.

KAPITEL 8

Experimentelle Evaluierung

In diesem Kapitel werden die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen neuen Verfahren und Konzepte auf ihre korrekte Funktion und ihre Praxistauglichkeit hin untersucht.

8.1 Neue Verfahren zur Bewegungskompression

Der Beweis für die Eignung der Bewegungskompression für die weiträumige Teleoperation mobiler Teleoperatoren über das Internet wurde bereits in [125] erbracht. Bei dem in Abbildung 8.1 dargestellten Experiment wurde ein sich in München befindender Teleoperator von einem Benutzer in Karlsruhe bedient. Dabei navigierte der Benutzer den Teleoperator durch eine ihm unbekannte Umgebung entlang zweier Gänge und durch eine Tür. Ein an das System gewöhnter Benutzer brauchte dafür, je nach Teilaufgabe, nur 3,0 bis 5,3 mal länger als beim direkten Abgehen derselben Strecke.



Abbildung 8.1: Screenshots aus dem Video³⁶ zum Telepräsenzexperiment zwischen Karlsruhe und München [125].

³⁶ <http://isas.uka.de/WWWikiDe/images/2/22/TelepresenceKaMuc.avi>

Im Vergleich mit einem weiteren Experiment in einer virtuellen Umgebung zeigte sich, dass nicht die Bewegungskompression hauptsächlich zu den erhöhten Ausführungszeiten beiträgt, sondern die zurzeit noch bestehenden Beschränkungen bei realen Zielumgebungen, wie z. B. das eingeschränkte Gesichtsfeld, die Trägheit des Teleoperators und die Latenz der Datenübertragung. Vergleicht man die Ausführungszeiten in einer virtuellen Umgebung, die einer realen Umgebung exakt nachempfunden wurde, und in der entsprechenden realen Umgebung, lässt sich – wie in [124] gezeigt – der Faktor auf 1,1 bis 1,7 reduzieren.

Auch die Funktion der in Kapitel 4 vorgestellten neuen Verfahren zur Bewegungskompression wurde für nicht-konvexe Pfadtransformation, geregelte Benutzerführung und stochastische Zielerkennung bereits unabhängig voneinander in [127], [129] und [130] gezeigt. An dieser Stelle soll nun die Praxistauglichkeit der vorgestellten Erweiterungen vor allem in Bezug auf Wechselwirkungen überprüft werden. Hierzu wurden, um das gesamte Spektrum abzudecken, jeweils zwei der neuen Verfahren mit einer virtuellen und einer realen Zielumgebung kombiniert.

8.1.1 Stochastische Zielerkennung und geregelte Benutzerführung

Aufbau

Um die Kombination von stochastischer Zielerkennung mit geregelter Benutzerführung zu überprüfen, bietet es sich, an eine virtuelle Zielumgebung zu verwenden, da hier sowohl die Lageinformation des Proxys in der Zielumgebung als auch die möglichen Zielobjekte bekannt sind.

Für dieses Experiment wurde eine konvexe Benutzerumgebung mit einer Grundfläche von $2 \times 2 \text{ m}^2$ verwendet. Um zu gewährleisten, dass der Benutzer bei kurzzeitigem Verlassen der Benutzerumgebung³⁷ nicht mit Gegenständen kollidiert, ist diese Umgebung mit einer zusätzlichen Sicherheitszone von 0,5 m ausgestattet.

In der virtuellen Zielumgebung, die ein Kunstmuseum darstellt, sind durch die an der Wand aufgehängten Bilder und durch die räumliche Gestaltung die möglichen Ziele gegeben. Insgesamt konnten in der in Abbildung 8.2 dargestellten Umgebung zehn Bilder, zwei Fenster (die im weiteren den Bildern zugeordnet wurden) und 22 räumliche Merkmale, wie Raumecken und Wandenden, identifiziert werden.

Die Bestimmung des jeweiligen Ziels des Benutzers erfolgt gemäß dem in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen zweistufigen Verfahren, bei dem zunächst die aktiven Ziele anhand ihrer Sichtbarkeit bestimmt werden³⁸ und anschließend eine Maximum-a-posteriori-Schätzung auf der diskreten Dichte über den aktiven Zielen durchgeführt wird. Die bedingte Dichte $f(\tilde{y})$ wurde als Gaußmischdichte mit nur einer Komponente über den relativen Merkmalen Abstand zum

³⁷ Es kann nie garantiert werden, dass der Benutzer die Umgebung nicht verlässt, da die einzige Einflussnahme der Benutzerführung auf den Benutzer über visuelle Hinweise erfolgt. Aus diesem Grund ist eine solche Sicherheitszone unabhängig von der gewählten Methode zur Benutzerführung empfehlenswert.

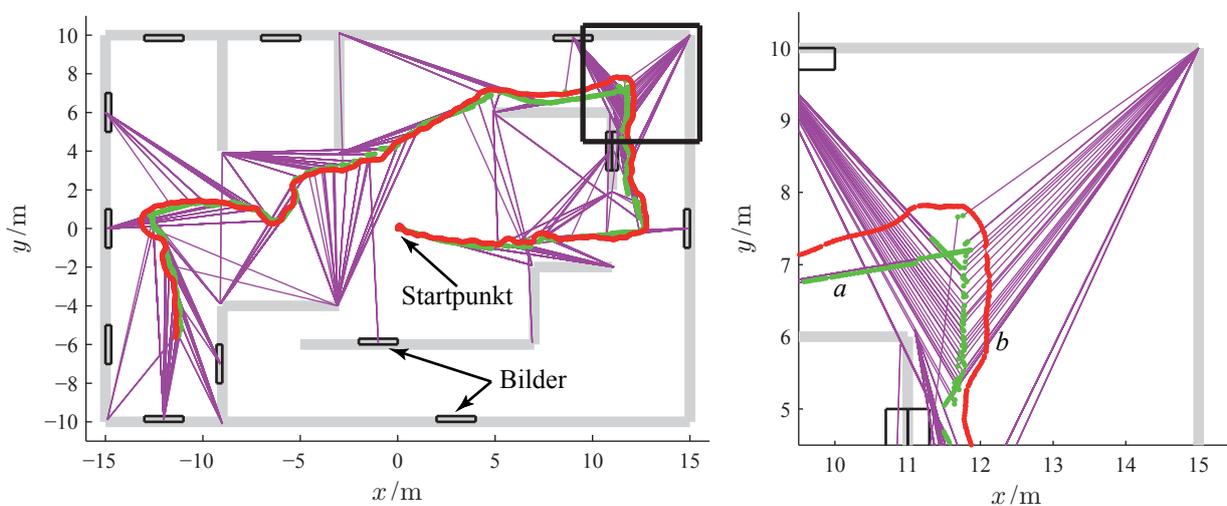
³⁸ Ein Bild gilt dann als sichtbar, wenn sein Mittelpunkt sichtbar ist.

Ziel, relative Blickrichtung und relative Laufrichtung mit den in [114] beschriebenen Verfahren aus mehreren Datensätzen bestimmt, bei denen der Benutzer während der Erkundung seiner Umgebung sein momentanes Ziel angegeben hat. Für den Prädiktionsparameter wurde $p = 0,5$ gewählt.

Die geregelte Zielprädiktion wurde den Ausführungen in Abschnitt 4.3.4 entsprechend mit dem Parameter $K_P = 1 \frac{1}{m}$ implementiert. Die momentanen Zielpfade wurden mit einer fehlererhaltenden Pfadprädiktion für gerade Zielpfade (Abschnitt 4.3.5) bestimmt, wobei der Endpunkt des jeweiligen Pfads das Ergebnis der stochastischen Zielerkennung ist.

Bewertung

Ein willkürlicher von einem Benutzer zurückgelegter Zielpfad ist in Abbildung 8.2(a) dargestellt. Neben dem Zielpfad sind dort die jeweiligen Planungsbezugspunkte und die jeweiligen momentan prädizierten Pfade vom Planungsbezugspunkt zum momentan erkannten Ziel dargestellt. Während die prädizierten Pfade immer nur eine Momentaufnahme darstellen, da die Zielerkennung jederzeit wechseln kann, stellen die Planungsbezugspunkte die Sollvorgabe für die Benutzerführung dar und bilden somit den Sollpfad. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der Sollpfad wegen der fehlererhaltenden Pfadprädiktion nur in Ausnahmefällen stetig ist.



(a) Gesamte Zielumgebung.

(b) Detailvergrößerung von (a). Die Pfadsegmente *a* und *b* sind durch unterschiedliches Verhalten der Zielerkennung zustande gekommen.

Abbildung 8.2: Der Pfad des Proxys durch die Zielumgebung (rot) und die prädizierten Pfade (magenta) vom jeweiligen Planungsbezugspunkt (grün) zum erkannten Zielobjekt.

Die Qualität der Zielerkennung kann nur subjektiv bewertet werden, da ein objektives Vergleichsmaß fehlt. Für die Bewegungskompression ist es obendrein nur von geringer Bedeutung, ob das erkannte Ziel tatsächlich mit dem anvisierten Wegpunkt des Benutzers übereinstimmt.

Vielmehr ist hier von Bedeutung, dass die prädizierten Pfade das tatsächliche Verhalten gut beschreiben. In Abbildung 8.2(a) ist zu sehen, dass dies an einigen Stellen der Fall ist, an anderen Stellen scheinen die prädizierten Pfade das Verhalten des Benutzers nicht zu beschreiben. In der Detailvergrößerung (Abbildung 8.2(b)) sind zwei Pfadsegmente zu sehen, die diese beiden Verhaltensweisen widerspiegeln. Bei Pfadsegment *a* wird stets das gleiche Ziel erkannt, somit liegen die Planungsbezugspunkte alle auf dem gleichen prädizierten Pfad, ein Verhalten, das bei naiver Betrachtungsweise erwartet wird. Bei Pfadsegment *b* hingegen wechselt die Zielerkennung zwischen zwei erkannten Zielen hin- und her. Das Ergebnis ist ein interpolierter Sollpfad, der auf einen zwischen den Zielen liegenden Punkt gerichtet ist.

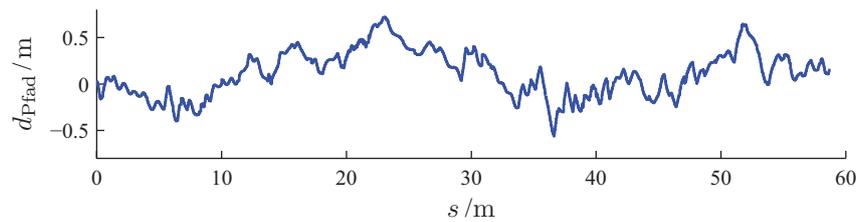


Abbildung 8.3: Abweichung d_{Pfad} vom prädizierten Pfad über die zurückgelegte Weglänge s .

Zur Beurteilung der geregelten Benutzerführung kann wieder der optische Eindruck herangezogen werden. In Abbildung 8.2 ist gut zu erkennen, wie der Zielpfad dem Sollpfad folgt. Dieser Eindruck wird bestätigt, wenn man in Abbildung 8.3 die Abweichung vom Sollpfad entlang des Pfads betrachtet. Dabei ist eine mittlere Abweichung von 0,0938 m mit einer Varianz von $0,0582 \text{ m}^2$ zu beobachten³⁹. Dieser Wert ist klein genug, um davon sprechen zu können, dass der Benutzer auf dem Sollpfad geführt wird.

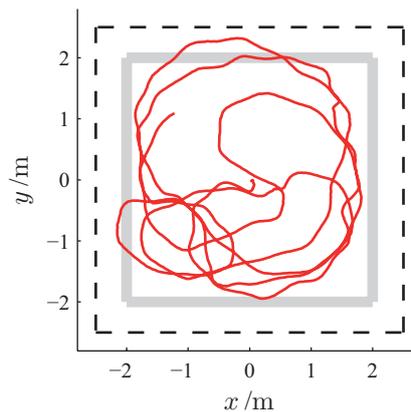


Abbildung 8.4: Pfad des Benutzers in der Benutzerumgebung.

Die Eignung der geregelten Benutzerführung für den praktischen Einsatz ist aber vor allem bei der Betrachtung der Benutzerumgebung (Abbildung 8.4) zu erkennen. Der Benutzer

³⁹ Es ist zu beachten, dass diese Fehler auch noch andere Faktoren, wie das Hin- und Herschwanzen des Benutzers beim Gehen und den Messfehler des Trackingsystems beinhalten, die nicht durch die geregelte Benutzerführung ausgeglichen werden können.

verlässt diese Umgebung nur an zwei Stellen kurzzeitig. Dabei kommt er aber dem Rand der Sicherheitszone nie gefährlich nahe, so dass die Sicherheit des Benutzers gewährleistet ist.

8.1.2 Nicht-konvexe Pfadtransformation und geregelte Benutzerführung

Aufbau

In einem zweiten Experiment soll die Echtzeit-Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen im praktischen Einsatz überprüft werden. Hierzu wurde die Benutzerumgebung um zwei innere Objekte von jeweils $1 \times 1 \text{ m}^2$ Größe ergänzt. Für den γ -Bogen-Algorithmus wurde im Gegensatz zum vorangegangenen Experiment $\gamma = \frac{\pi}{2}$ gewählt, da der Algorithmus hier mit geringerer Vorausschau arbeitet und somit auch in engen Regionen der Umgebung noch weite Bögen gefunden werden können.

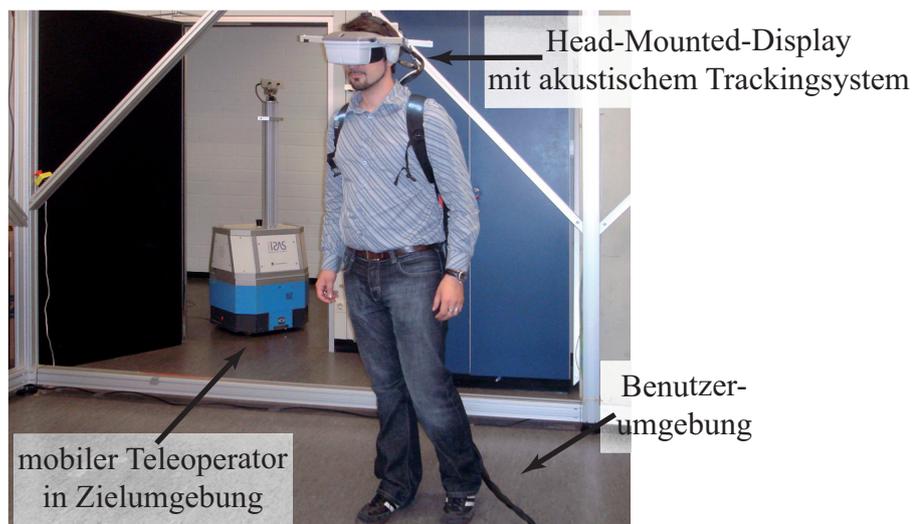


Abbildung 8.5: Aufbau für das Telepräsenzexperiment in realer Zielumgebung. Das Satelliten-Rechnersystem wird vom Benutzer verdeckt.

Um zu überprüfen, ob es unerwünschte Wechselwirkungen zwischen der geregelten Benutzerführung und der Regelung eines mobilen Teleoperators gibt, wurde für dieses Experiment, wie in Abbildung 8.5 dargestellt, eine reale Zielumgebung verwendet. Dabei basiert die Selbstlokalisierung des Teleoperators allein auf seiner Odometrie. Da es hierbei üblicherweise zu einem Drift kommen kann und somit die tatsächliche Lage des Teleoperators in der Zielumgebung nur ungefähr bekannt ist, wurde auf eine einfache, allein auf der Blickrichtung des Benutzers basierende Zielerkennung zurückgegriffen. Hierbei wird das Zielobjekt stets 35 m in Blickrichtung angenommen. Die Pfadprädiktion prädiziert die momentanen Zielpfade, wie von der geregelten Benutzerführung verlangt, weiterhin fehlererhaltend vom Planungsbezugspunkt zum Zielobjekt.

Bewertung

Der Pfad des Teleoperators in der Zielumgebung, ausgehend von einem Startpunkt, entlang zweier Gänge und durch einen Türdurchgang zum Endpunkt ist in Abbildung 8.6 dargestellt. Es sind sowohl der Sollpfad des Teleoperators, der den Vorgaben aus der Bewegungskompression entspricht, als auch der tatsächliche Roboterpfad zu sehen.

Die geringen Abweichungen zwischen den beiden Pfaden resultieren aus der Regelung des mobilen Teleoperators und sind durchaus erwünscht. Die Lageregler der Plattform wurden so eingestellt, dass einer glatteren Teleoperatorbahn vor der exakten Pfadverfolgung Vorrang gewährt wurde. Dies hat zwei Vorteile: Zum Einen entstehen somit weniger Vibrationen in der Plattform, die sich über den Teleoperatorhals auf den Kamerakopf übertragen und zu einem stark bewegten Kamerabild führen, was die Orientierung in der Zielumgebung erschwert. Zum Anderen erleichtert eine solche Bahn die Steuerung des Teleoperators durch enge Durchfahrten, wie z. B. Türen.

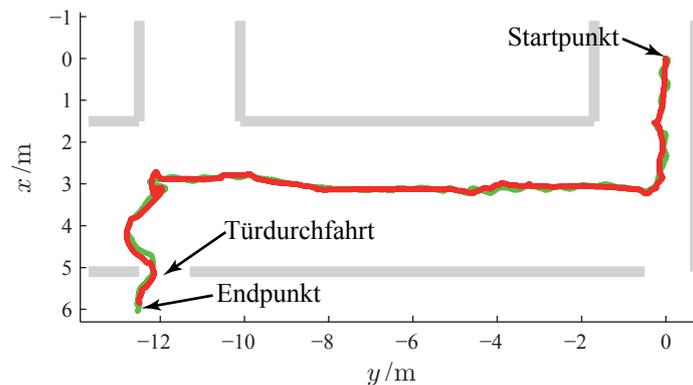


Abbildung 8.6: Sollpfad (grün) und tatsächlicher Pfad (rot) des Teleoperators in der Zielumgebung. Die eingezeichneten Wände dienen nur der Veranschaulichung. Die tatsächliche Teleoperatorposition im Raum lässt sich nicht rekonstruieren, da die Selbstlokalisierung der mobilen Plattform allein auf der Odometrie basiert.

Anders verhält es sich bei der Blickrichtung. Hier ist es aus zwei Gründen wichtig, dass der Vorgabe sehr schnell und exakt gefolgt wird. Zum Einen nimmt der Benutzer eine Verzögerung bei rotatorischen Bewegungen viel stärker wahr als bei translatorischen Bewegungen. Sie würde also den Präsenzeindruck verringern. Zum Anderen wird der Benutzer durch eine zusätzliche rotatorische Transformation auf dem Benutzerpfad geregelt. Ein schlechtes Folgeverhalten kann zum Abweichen vom Pfad und somit zur Kollision mit Wänden der Benutzerumgebung führen, was unbedingt zu verhindern ist.

Abbildung 8.7 zeigt, wie die Teleoperatorregelung die Blickrichtungsänderungen zwischen Plattform und Kamerakopf verteilt. Wie gewünscht werden langsame weite Drehungen von der Plattform ausgeführt. Die Differenz zwischen der Sollorientierung in der Zielumgebung und

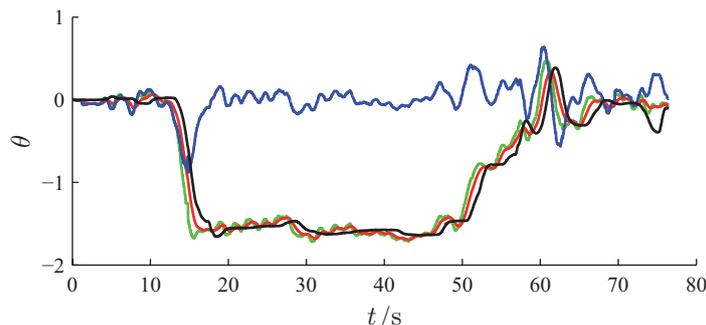


Abbildung 8.7: Sollorientierung des Teleoperators (grün), Sollorientierung der Plattform (rot), tatsächliche Orientierung der Plattform (schwarz) und Vorgabe für den Schwenk-Neige-Kopf (blau).

der Plattformorientierung wird dem Schwenk-Neige-Kopf als Sollorientierung vorgegeben, die dieser schnell ungeregelt einstellt.

Betrachtet man die Benutzerumgebung (Abbildung 8.8), ist gut zu erkennen, wie der Sollpfad des Benutzers, also der in die Benutzerumgebung transformierte prädizierte Zielpfad, unter Ausnutzung eines Großteils der Benutzerumgebung an den inneren Objekten vorbeigeführt wird.

Die Radien der γ -Bögen entlang des Pfads sind in Abbildung 8.9 dargestellt. Sie schwanken zwischen 0,33 m und 3,15 m mit einem mittleren Radius von 1,53 m. Dabei fällt auf, dass die Radien nicht sprunghaft enger werden. Die bei einem solchen Verhalten auftretende starke Kompression des Pfads könnte vom Benutzer als störend empfunden werden. Vielmehr werden die Radien bei Annäherung an ein inneres Objekt oder eine Außenwand sukzessiv enger. Ist das Hindernis passiert weiten sich die γ -Bögen schnell und minimieren so die Krümmungsdifferenz zwischen prädiziertem und transformiertem Pfad.

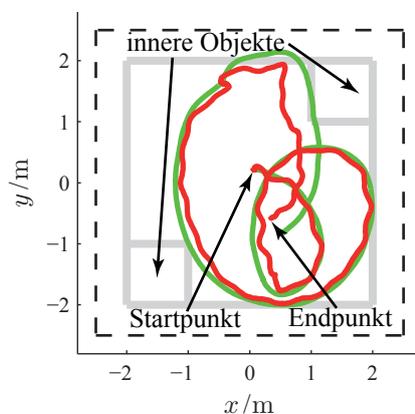


Abbildung 8.8: Der aus der nicht-konvexen Pfadtransformation resultierende Sollpfad (grün) in der Benutzerumgebung und der tatsächliche Benutzerpfad (rot).

Der tatsächliche Benutzerpfad folgt, wie in Abbildung 8.8 gezeigt, dem Sollpfad des Benutzers sehr eng. Dies entspricht dem gewünschten Verhalten der geregelten Benutzerführung. Eine unerwünschte Wechselwirkung mit der Regelung des mobilen Teleoperators ist also auszuschließen.

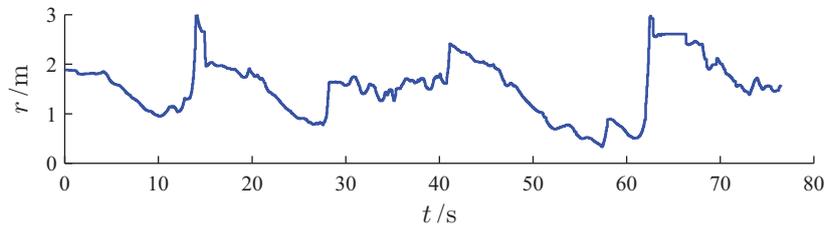


Abbildung 8.9: Der Radiusverlauf der γ -Bögen während des Experiments.

8.2 Weiträumige haptische Interaktion

In diesem Abschnitt soll das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept für semi-mobile haptische Schnittstellen anhand der in Kapitel 6 entwickelten beispielhaften Implementierung auf seine Tauglichkeit für die weiträumige Telepräsenz überprüft werden. Hierzu wird zunächst evaluiert, inwieweit es möglich ist, einem Benutzer aus der Bewegung heraus definierte Kräfte darzustellen. Anschließend werden die zur optimalen Vorpositionierung entwickelten Methoden dahingehend untersucht, ob sie eine freie weiträumige Bewegung des Benutzers erlauben und dabei den haptischen Manipulator stets in einer Konfiguration halten, in der eine realitätsnahe Kraftdarstellung möglich ist.

Insgesamt soll hier allerdings weniger Wert auf die exakte wirklichkeitsnahe Darstellung von Kräften gelegt werden. Vielmehr soll die prinzipielle Tauglichkeit der entwickelten Komponenten und Methoden überprüft werden. Fällt diese Evaluierung positiv aus, lohnt es sich, in die Weiterentwicklung der SMHI und vor allem ihrer Regelung zu investieren.

8.2.1 Darstellung definierter Kräfte

Aufbau

Die Fähigkeit zur Darstellung definierter Kräfte soll an den zwei Beispielen überprüft werden, die die größte Herausforderung für eine haptische Schnittstelle darstellen: freie Bewegung und harter Kontakt.

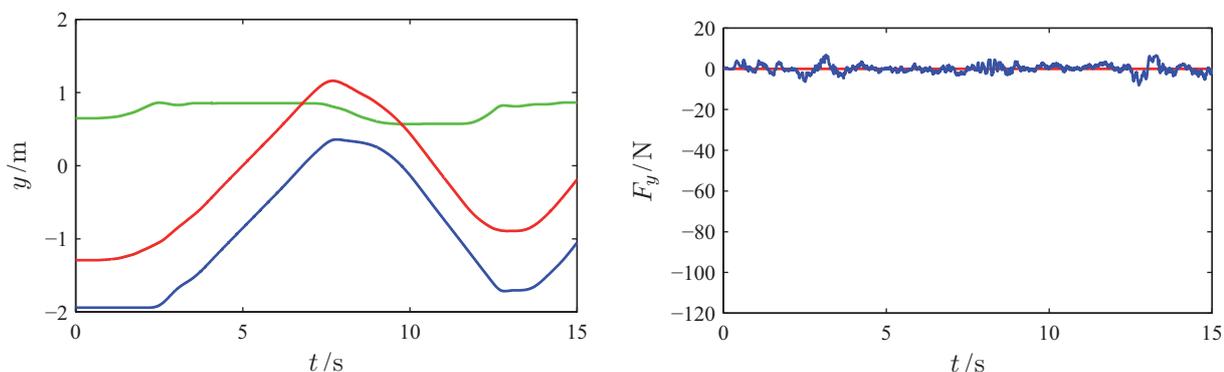
Bei freier Bewegung soll die haptische Schnittstelle möglichst transparent für den Benutzer sein und sich gleichsam ohne Kraft aufzuwenden bewegen lassen. Entsprechend gilt in diesem Fall am Endeffektor $\underline{F}_{soll} = \underline{0}$. Beim harten Kontakt hingegen werden die Parameter \mathbf{K} und \mathbf{B} aus Gleichung (5.8) innerhalb von Objekten möglichst groß gewählt, um so einen möglichst realistischen Kontakt, z. B. mit einer Wand, zu simulieren.

Im folgenden Experiment wurden Bewegung und Kraftsimulation zur besseren Übersicht nur entlang einer Achse, der y -Achse des Linearsystems, durchgeführt. Bei hartem Kontakt wurden innerhalb der Wände für die, jetzt skalaren, Parameter die Werte $k = 700 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ und $b = 0 \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ gewählt, außerhalb der Wände wurde auch $k = 0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ gesetzt. Auf eine höhere Dämpfung und damit eine realistischere Simulation wurde verzichtet, da von der Sensorik der haptischen Schnittstelle gegenwärtig nur Positionen weitergegeben werden und das haptische Rendering dann auf Geschwindigkeiten, die aus Positionsinformationen rekonstruiert sind, basieren würde. Da diese typischerweise große hochfrequente Anteile haben, würden hierdurch die Ergebnisse verfälscht. Bei sämtlichen Versuchen wurde die simulierte Endeffektormasse $m = 0 \text{ kg}$ gewählt.

Bewertung

In Abbildung 8.10(a) ist die Position des Endeffektors y_E über den Zeitraum von 15 s bei freier Bewegung dargestellt. Dabei wird der Endeffektor über eine Strecke von mehr als zwei Metern bewegt. Da diese Bewegung deutlich über der maximalen Auslenkung des haptischen Manipulators von 0,57 m liegt, wird sie, wie ebenfalls in Abbildung 8.10(a) dargestellt, von der Vorpositioniereinheit ausgeglichen, um den haptischen Manipulator y_S stets in der Nähe der optimalen Manipulierbarkeit zu halten, die bei einem Abstand von 0,813 m vom Manipulatorfußpunkt auf dem Linearsystem gegeben ist.

Die während dieser Bewegung gemessene Kraft am Endeffektor ist in Abbildung 8.10(b) dargestellt. Sie weicht nur geringfügig von der Sollkraft $F_{y,soll} = 0$ ab.



(a) Endeffektorposition y_E (rot), Position Linearsystem y_L (blau) und die Endeffektorposition relativ zum Manipulatorfußpunkt y_S (grün).

(b) Sollkraft $F_{y,soll} = 0$ (rot) und gemessene Kraft am Endeffektor $F_{y,ist}$ (blau).

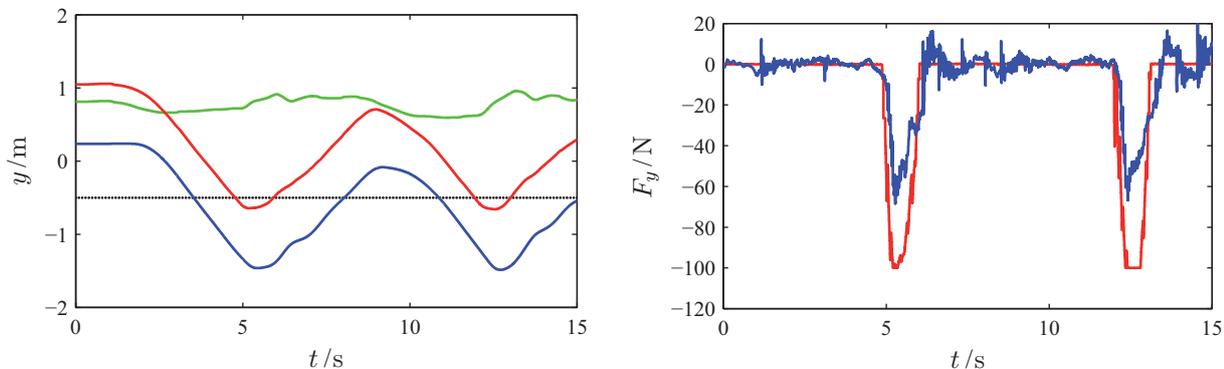
Abbildung 8.10: Koordinierte Bewegung von haptischem Manipulator und Vorpositioniereinheit und auftretende Kräfte am Endeffektor bei freier Bewegung entlang einer Achse.

Abbildung 8.11(a) zeigt die Trajektorie des Endeffektors, der zweimal (bei $t \approx 5 \text{ s}$ und bei $t \approx 12 \text{ s}$) aus einer weiträumigen Bewegung gegen eine virtuelle Wand bei $y_W = -0,5 \text{ m}$ geführt wird. Dabei ist deutlich zu sehen, dass die koordinierte Bewegung von haptischem Endeffektor

und Vorpositioniereinheit nicht durch die Kraftdarstellung beeinflusst wird. Das Eindringen in die Wand von mehreren Zentimetern ist der stark vereinfachten Wandsimulation, wie sie oben beschrieben wurde, geschuldet.

Die Sollkraft $F_{y,soll}$ und die tatsächlich gemessene Kraft am Endeffektor \hat{F}_y sind in Abbildung 8.11(b) dargestellt. Es ist zu sehen, dass die tatsächliche Kraft der Sollkraft schnell folgt. Die maximal darstellbare Kraft scheint bei ca. 60 N zu liegen, womit die Spezifikationen zur Kraftdarstellung erfüllt sind.

Beim Verlassen der Wand, also beim Übergang vom harten Kontakt zur freien Bewegung, ist ein leichtes Schwingen in der gemessenen Kraft zu beobachten. Dieses Regelungsartefakt hat seine Ursache in den für diese Konzeptverifikation verwendeten sehr einfachen Gelenkreglern und im wenig realistischen haptischen Rendering und lässt sich noch deutlich verringern.



(a) Endeffektorposition y_E (rot), Position Linear-system y_L (blau), Endeffektorposition relativ zum Manipulatorfußpunkt y_S (grün) und die Wandposition y_W (schwarz gepunktet).

(b) Sollkraft $F_{y,soll}$ (rot) und gemessene Kraft am Endeffektor $F_{y,ist}$ (blau).

Abbildung 8.11: Koordinierte Bewegung von haptischem Manipulator und Vorpositioniereinheit und auftretende Kräfte am Endeffektor bei Bewegung entlang einer Achse mit Wandkontakt.

8.2.2 Weiträumige Bewegung und haptische Interaktion

Aufbau

Zur Überprüfung der Methoden zur optimalen Vorpositionierung wurde ein Szenario zur weiträumigen Bewegung mit simultaner haptischer Interaktion aufgebaut.

Zur besseren Übersicht wurden bei diesem Experiment Ziel- und Benutzerumgebung zur Deckung gebracht, d. h. es wurde auf den Einsatz der Bewegungskompression verzichtet. Die freie Bewegung des Benutzers in der xy -Ebene ist also nur durch die Begrenzung der Benutzerumgebung eingeschränkt. Innerhalb der Umgebung wurden zwei virtuelle Hindernisse erstellt, die vom Benutzer haptisch exploriert werden.

Die Positionierung der linearen Vorpositioniereinheit folgt wie in Abschnitt 6.4 beschrieben zwei Optimierungskriterien. Durch die Optimierung der Manipulierbarkeit des haptischen Manipulators ist stets dafür gesorgt, dass sich der Manipulator in einer Konfiguration befindet, die eine gute Kraftdarstellung erlaubt. Sie bestimmt den SCARA-Öffnungswinkel ψ , dessen optimaler Wert bei $\psi^* = 2,048$ gegeben ist. Das zweite Optimierungskriterium stellt die Maximierung der Bewegungsfreiheit des Benutzers dar. Hierdurch wird der SCARA-Orientierungswinkel ϕ bestimmt. Dieser ist optimal, wenn der Manipulatorfußpunkt \underline{x}_L auf einer Linie mit Endeffektorposition \underline{x}_E und Benutzer \underline{x}_H auf der dem Benutzer abgewandten Seite des Endeffektors liegt.

Abbildung 8.12 zeigt einen Benutzer bei der weiträumigen haptischen Exploration einer virtuellen Umgebung. Dabei liefert das am Head-Mounted-Display angebrachte akustische Trackingssystem die für die optimale Vorpositionierung benötigte Kopfposition. Alle weiteren zur Regelung benötigten Informationen werden aus der Gelenksensorik bestimmt.

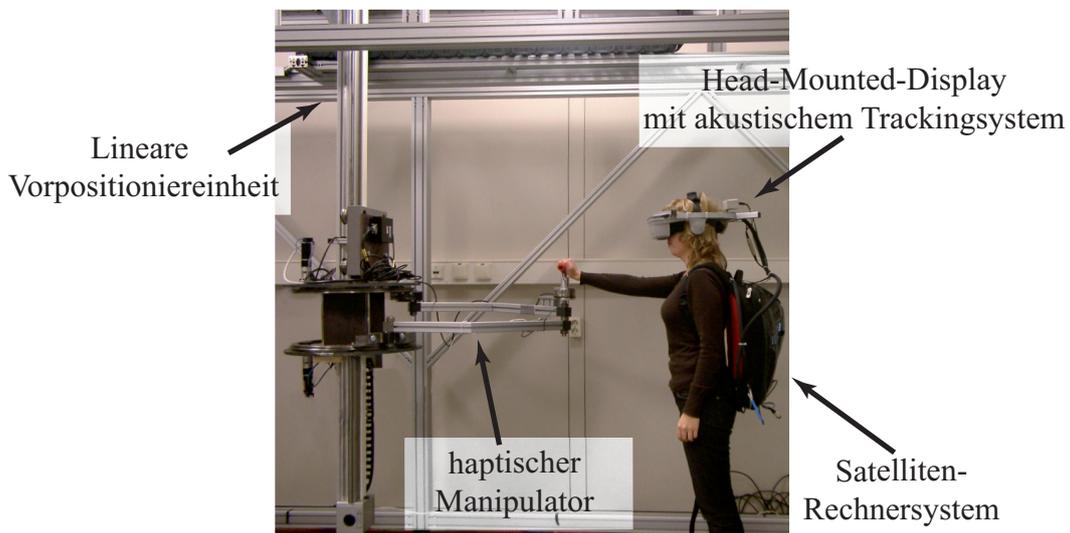


Abbildung 8.12: Experimentalaufbau in der Benutzerumgebung [120].

Bewertung

Die Trajektorien des Kopfs des Benutzers, des Endeffektors und der linearen Vorpositioniereinheit während der weiträumigen Exploration der zuvor beschriebenen Umgebung sind in Abbildung 8.13 dargestellt. Die Bewegung lässt sich dabei grob in vier Segmente einteilen, deren Grenzen durch schwarze Kreuze dargestellt sind.

Die Trajektorien beginnen mit einer Vorwärtsbewegung in Richtung des Hindernisses (*a*). Anschließend folgt eine seitliche Bewegung entlang Hindernis 1 (*b*) und Hindernis 2 (*c*). Zum Schluss dreht sich der Benutzer nahezu auf der Stelle (*d*).

Die Arbeitsweise der optimalen Vorpositionierung ist in Abbildung 8.13 gut zu erkennen. Das Linearsystem befindet sich stets auf der dem Benutzer abgewandten Seite des Endeffektors

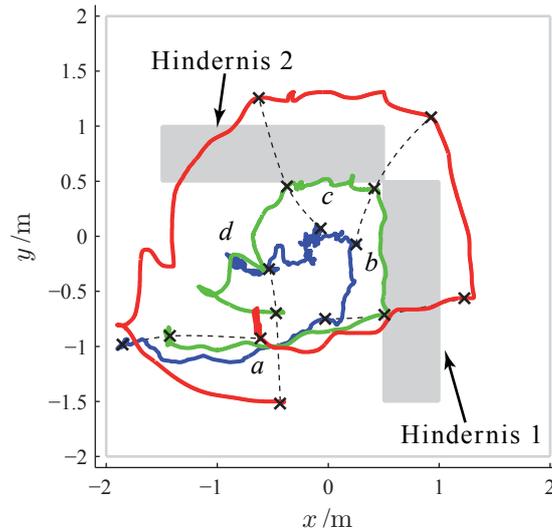


Abbildung 8.13: Kopftrajektorie (blau), Endeffektortrajektorie (grün) und Trajektorie der Lineareinheit (rot) bei der Exploration einer Umgebung mit zwei Hindernissen.

und liegt – man sieht das besonders gut an den Segmentgrenzen – nahezu auf einer Linie mit Kopf- und Endeffektorposition. Dies entspricht den Vorgaben gemäß der Maximierung der Bewegungsfreiheit.

Die für die SCARA-Konfiguration maßgeblichen Winkel ϕ und ψ während des Experiments sind in Abbildung 8.14 dargestellt. Erwartungsgemäß bleibt die SCARA-Orientierung ϕ während der Vorwärtsbewegung in Segment *a* nahezu konstant und wächst anschließend gleichmäßig mit der Bewegung des Benutzers. Der Öffnungswinkel ψ bleibt während des gesamten Experiments in der Nähe des Optimalwerts von 2,048, weicht allerdings kurzfristig davon ab, um schnelles Beschleunigen oder Abbremsen des Endeffektors zu kompensieren. Solche Bewegungen können sowohl vom Benutzer initiiert sein, als auch aus der Kraftregelung resultieren und sind nur

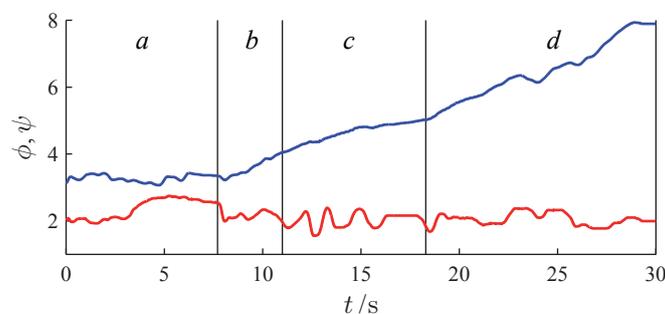


Abbildung 8.14: SCARA-Öffnungswinkel $\hat{\psi}$ (rot) und SCARA-Orientierung $\hat{\phi}$ (blau) während des Experiments.

möglich, da sich der haptische Manipulator durch die Optimierung der Manipulierbarkeit stets in einer Konfiguration befindet, die weit von einer Singularität entfernt ist.

8.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde an realistischen Szenarien die korrekte Funktionsweise und die Praxistauglichkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Systeme und Methoden überprüft. Zusammen mit den Details aus schon vorliegenden Einzelexperimenten ergibt sich ein umfassend positives Bild.

Sowohl für virtuelle als auch reale Einsatzumgebungen sind die neuen Verfahren der Bewegungskompression bestens geeignet. In Umgebungen mit bekanntem Modell können durch die stochastische Zielerkennung die momentanen Zielpfade des Benutzers sehr gut vorhergesagt werden. Kollisionen mit Hindernissen in der Zielumgebung werden von der geregelten Benutzerführung erfolgreich verhindert, die dabei keine Wechselwirkungen mit der Regelung des mobilen Teleoperators zeigt. Im Experiment konnte weiterhin gezeigt werden, dass auch enge Türdurchfahrten weiterhin möglich sind, dem subjektiven Empfinden des Autors nach fällt dies dem Benutzer leichter als mit der herkömmlichen Benutzerführung. Auch die Echtzeit-Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen konnte erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden. Sie führt den Pfad an inneren Objekten vorbei, ohne durch plötzliche übermäßig starke Kompression den Präsenzeindruck zu beeinträchtigen.

Die semi-mobile haptische Schnittstelle hat sich als geeignetes Konzept für haptische Interaktion bei simultaner weiträumiger Bewegung erwiesen. Selbst mit den hier verwendeten sehr einfachen P-Positions- und PID-Gelenkwinkelreglern konnten schon befriedigende Ergebnisse bei der Simulation von freier Bewegung und hartem Kontakt erzielt werden. In Verbindung mit der visuellen Information wird dem Benutzer so ein guter Eindruck der Zielumgebung vermittelt. Allerdings besteht hier noch Verbesserungspotenzial, da z. B. prädiktive Regler, die unter Verwendung detaillierter Systemmodelle erstellt wurden, zur exakteren Regelung des haptischen Manipulators eingesetzt werden und somit den Fehler in der Kraftdarstellung minimieren können. Als uneingeschränkt praxistauglich hat sich das Konzept zur optimalen Vorpositionierung erwiesen. Der haptische Manipulator wird dadurch stets in einer Konfiguration gehalten, die ihm eine realitätsnahe Kraftdarstellung ermöglicht.

KAPITEL 9

Schlussbemerkungen

In diesem Kapitel sollen noch einmal die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst werden. Dabei werden hier nur die Kernpunkte angesprochen. Eine ausführlichere Diskussion der Ergebnisse findet sich jeweils am Ende der entsprechenden Kapitel. Anschließend an die Zusammenfassung werden mögliche zukünftige Ergänzungen und Weiterentwicklungen des vorgestellten Telepräsenzsystems angesprochen und weitere Forschungsthemen, die auf dieser Arbeit aufbauen, diskutiert.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Kapitel 1 wurde nach einer allgemeinen Einleitung erörtert, welche Bedeutung die einzelnen menschlichen Sinne für den Präsenzeindruck und die Fähigkeit zu Manipulation und Navigation haben. Basierend auf diesen aus der Literatur zusammengetragenen Erkenntnissen wurden die Anforderungen an ein System zur weiträumigen Telepräsenz mit simultaner haptischer Interaktion formuliert. Diese Anforderungen umfassen eine immersive audio-visuelle Schnittstelle, eine Bewegungsschnittstelle, die weiträumige Bewegung durch natürliches Gehen vermittelt und eine haptische Schnittstelle, die unbeschränkte weiträumige Bewegung innerhalb der Benutzerumgebung erlaubt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei auf der Bewegungs- und der haptischen Schnittstelle.

Kapitel 2 untersucht die Literatur anhand der zuvor identifizierten Anforderungen nach geeigneten Lösungen für Bewegungs- und haptische Schnittstellen. Dabei wurde bei den haptischen Schnittstellen keines der bekannten Konzepte als geeignet befunden, so dass der Entschluss naheliegt einen neuen Typ haptischer Schnittstellen, der speziell auf die Anforderungen zugeschnitten ist, zu entwickeln. Bei den Bewegungsschnittstellen sind vor allem die algorithmischen Lösungen geeignet, da sie ohne zusätzliche komplexe technische Systeme auskommen. Die Entscheidung, das Verfahren der Bewegungskompression einzusetzen und substanziell zu erweitern wurde auch deshalb getroffen, weil dieses Verfahren anderen Algorithmen, die auf ähnlichen Grundideen basieren, überlegen ist.

Die wichtigsten Konzepte der Bewegungskompression werden in Kapitel 3 basierend auf der vorhandenen Literatur so vorgestellt, dass die späteren Erweiterungen vorbereitet werden. Die Bewegungskompression erlaubt unbegrenzte weiträumige Bewegung in einer Zielumgebung durch natürliches Gehen in einer begrenzten Benutzerumgebung. Dabei wird in drei Schritten vorgegangen. Die *Pfadprädiktion* sagt den gewünschten Zielpfad vorher. Die *Pfadtransformation* verkrümmt diesen Pfad so, dass er komplett in der Zielumgebung liegt, ohne mit deren Rändern oder darin enthaltenen Hindernissen zu kollidieren. Die *Benutzerführung* leitet den Benutzer schließlich auf dem transformierten Pfad, gibt ihm dabei aber den visuellen Eindruck, auf dem ursprünglich beabsichtigten Zielpfad zu gehen. Die Bewegungskompression stellt ein algorithmisches Framework dar, dessen einzelne funktionale Module ausgetauscht werden können. Dabei ist bei korrekter Implementierung, ohne unzulässige Abhängigkeiten zwischen den Modulen, die Pfaddarstellung in den jeweiligen Umgebungen das einzige Kompatibilitätskriterium.

In Kapitel 4 werden für jedes der drei Module der Bewegungskompression neue systematische Realisierungen vorgestellt. Diese lassen sich auch mit den vorhandenen Realisierungen kombinieren. Eine der Haupteinschränkungen der klassischen Bewegungskompression ist die Beschränkung auf konvexe Benutzerumgebungen. In Abschnitt 4.1 wird die Pfadtransformation für nicht-konvexe Benutzerumgebungen zunächst in allgemeiner Form als Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen dargestellt. Hierzu wird eine Pfaddarstellung gefunden, die einerseits geeignet ist, beliebige Pfade darzustellen, andererseits die Zahl der zu optimierenden Parameter klein hält. Da die Nebenbedingungen, die aus den nicht-konvexen Beschränkungen der Benutzerumgebung erwachsen, den Einsatz bekannter Optimierungsverfahren nicht gestatten, werden sie in ein zweites Optimierungsziel in Form von Potenzialfeldern übergeführt. Für dieses so modifizierte Optimierungsproblem lässt sich mit einem Progressionsansatz und Standardoptimierungsverfahren eine sehr gute Lösung finden, allerdings ist der Zeitaufwand für die Optimierung in einer Echtzeitanwendung nicht vertretbar. Deshalb wird für den Spezialfall von aus Geradenstücken zusammengesetzten Zielpfaden ein inkrementeller Algorithmus zur Echtzeitpfadtransformation in nicht-konvexen Benutzerumgebungen entwickelt, dessen Ergebnisse ähnliche Eigenschaften haben wie die Lösungen des Optimierungsproblems.

Ein neuer Ansatz zur Pfadprädiktion, der sich das vorhandene Wissen über bekannte Zielumgebungen zu Nutze macht, wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Bei als Gerade angenommenen Zielpfaden lässt sich die Pfadprädiktion auf die Zielerkennung reduzieren. Hierfür wird ein neues Verfahren vorgestellt. In einer systematischen Herleitung wird ein stochastisches Filter entwickelt, das auf Basis kontinuierlicher Messungen der Lage des Proxys in der Zielumgebung das momentane Benutzerziel aus einer Menge von diskreten möglichen Zielen erkennt. Die Verwendung von relativen Merkmalen führt zu einer vereinheitlichten Betrachtung der Zielobjekte, so dass während der Laufzeit neue bisher unbekannte Zielobjekte hinzugefügt oder entfernt werden können. Damit wurde der Verwendung automatisch identifizierter möglicher Zielobjekte der Boden bereitet.

Die in Abschnitt 4.3 vorgestellte geregelte Benutzerführung macht die bisherige unsystematische Verknüpfung zwischen Pfadprädiktion und Benutzerführung überflüssig. Die geregelte

Benutzerführung hält den Benutzer durch eine Reglerkomponente auf dem transformierten Pfad, so dass auf das zusätzliche Korrektiv aus der Pfadprädiktion verzichtet werden kann. Der Regler basiert dabei auf dem neuen Paradigma der Blicktransformation, einer Ergänzung der Momentantransformation zwischen Benutzer- und Zielumgebung um einen fehlerabhängigen rotatorischen Anteil. Durch die Blicktransformation wird die Abweichung vom Pfad als Fehlorientierung zum Ziel wahrgenommen und daraufhin vom Benutzer korrigiert.

In Kapitel 5 wird mit den *semi-mobilen haptischen Schnittstellen* ein neuer Typ haptischer Schnittstellen eingeführt. Das Konzept ist ideal auf weiträumige Telepräsenzsysteme abgestimmt und verbindet die Vorzüge bodengebundener und mobiler haptischer Schnittstellen, indem es freie weiträumige Bewegung in einer begrenzten Umgebung erlaubt. Die Grundidee der SMHI besteht in der Trennung von haptischer Interaktion und weiträumiger Bewegung. Folgerichtig besteht sie aus zwei Subsystemen, einem kraftgeregelten haptischen Manipulator und einer Vorpositioniereinheit, die den haptischen Manipulator stets in einer Konfiguration der optimalen Manipulierbarkeit hält.

Die Realisierung dieses Konzepts wird in Kapitel 6 anhand eines prototypischen Systems im Detail beschrieben. Der haptische Manipulator wurde dabei in einer speziellen Parallel-SCARA-Bauweise realisiert und besitzt einen unendlichen rotatorischen Freiheitsgrad, so dass er die Bewegung des Benutzers nicht einschränkt. Die Vorpositioniereinheit hingegen wurde durch ein dreiachsiges Linearsystem mit einem sehr großen Arbeitsraum realisiert. Für beide Systeme wurde das kinematische Modell hergeleitet und darauf basierend die Reglerarchitektur für das Gesamtsystem realisiert. Da für die optimale Vorpositionierung allein durch die Optimierung der Manipulierbarkeit keine eindeutige Lösung gefunden werden kann, wird mit der Maximierung des Freiraums des Benutzers ein weiteres Optimierungsziel hinzugezogen. Sämtliche Regelaufgaben, inklusive der Sensorvorverarbeitung und Motoransteuerung, wurden auf einer eigens für dieses System entwickelten verteilten Steuerungselektronik implementiert.

Kapitel 7 fasst alle im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte und Lösungen zusammen, die zwar für die Realisierung des vorgestellten Telepräsenzsystem unerlässlich sind, aber nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen. Das Kernstück des Telepräsenzsystems stellt die modulare CORBA-basierte Softwarearchitektur dar, über die sämtliche Soft- und Hardwarekomponenten kommunizieren. Darüber hinaus ermöglicht sie, das System zur Laufzeit zu konfigurieren. Außerdem wird in diesem Kapitel der Aufbau und die Regelung des mobilen Teleoperators, der aus einer omnidirektionalen Plattform und einem Schwenk-Neige-Kopf besteht, beschrieben. Durch die omnidirektionale Plattform hat er volle Flächenbeweglichkeit und ist somit geeignet, die Bewegungen des Benutzers nachzuvollziehen. Mit der vereinheitlichten Pipeline für Streaming-Daten und der darauf basierenden Realisierung der audio-visuellen Schnittstelle wird die Beschreibung des Telepräsenzsystems vervollständigt.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit der experimentellen Evaluierung der Methoden und Systeme dieser Arbeit. In vier Experimenten wurden unterschiedliche Teilaspekte überprüft. Dabei haben sich die neuen Verfahren für die Bewegungskompression als uneingeschränkt geeignet für

reale und virtuelle Zielumgebungen gezeigt. Unerwünschte Wechselwirkungen zwischen den Modulen konnten keine festgestellt werden. Auch für die haptische Interaktion konnte experimentell die Eignung der vorgestellten Konzepte nachgewiesen werden. Selbst mit den eingesetzten sehr einfachen Gelenkreglern ist schon eine befriedigende Kraftdarstellung möglich.

9.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die zukünftigen Arbeiten am hier vorgestellten Telepräsenzsystem werden sich mit Sicherheit zunächst der Optimierung der Darstellungsqualität der semi-mobilen haptischen Schnittstelle und ihrer vollständigen Integration in die modulare Telepräsenzumgebung widmen.

Danach wird es wichtig sein, auch in realen Zielumgebungen Manipulationsaufgaben durchzuführen. Hierzu muss allerdings der mobile Teleoperator mit einem Manipulatorarm ausgestattet werden. Da dieser andere kinematische und dynamische Eigenschaften haben wird als der haptische Manipulator, ist abzusehen, dass für dieses Szenario eine einfache Krafrückkopplung nicht mehr ausreichend ist, so dass auch die Regelungsstrategie noch einmal überarbeitet werden muss.

Längerfristig ist für eine echte wirklichkeitsnahe Manipulation in entfernten Umgebungen auf Zweihandmanipulation nicht zu verzichten. Das widerspricht zwar nicht dem grundsätzlichen Konzept der SMHI, allerdings wird hierfür eine Realisierung mit zwei haptischen Manipulatoren, die sich gegenseitig nicht stören, benötigt.

Eine weitere Verbesserung der Wirklichkeitsnähe des Gesamtsystems ließe sich durch Integration sogenannter *passiver Haptik* erreichen. Durch unterschiedliche Bodenbeläge könnte ein Laufgefühl erreicht werden, das der Zielumgebung besser entspricht. Sogar Bewegung in der dritten Dimension könnten durch Treppenelemente⁴⁰ in der Benutzerumgebung realisiert werden. Hierzu müsste die Pfadtransformation so modifiziert werden, dass Objekte, wie Treppen, oder Bereiche, z. B. mit verschiedenen Bodenbelägen, in der Benutzerumgebung mit entsprechenden Objekten bzw. Bereichen aus der Zielumgebung zur Deckung gebracht werden. Dies ließe sich z. B. durch zusätzliche Optimierungsziele erreichen.

Auch das eingangs vorgestellte Anwendungsszenario des Service-Centers zur telepräsenten Ausnahmebehandlung bei humanoiden Robotern ließe sich noch weiter optimieren. Durch Einsatz von Mehrbenutzerumgebungen, d. h. Benutzerumgebungen, in denen sich mehrere Benutzer gleichzeitig bewegen, ließe sich die Raumausnutzung deutlich verbessern. Ein weiterer Vorteil, der daraus resultiert, dass die Umgebung für mehrere Benutzer sicher größer ist als für einen einzelnen, liegt in der geringeren Pfadkrümmung. Bereits in [127] wurde angedacht, Mehrbenutzerumgebungen auf nicht-konvexe Benutzerumgebungen zurückzuführen. In diesem Fall würde

⁴⁰ Natürlich können hier keine normalen Treppenelemente eingesetzt werden. Vielmehr müsste eine Art rückwärts laufender Rolltreppe aufgebaut werden, so dass der Benutzer beim Treppensteigen tatsächlich keine Höhe gewinnt.

jeder Benutzer für alle anderen ein inneres Objekt darstellen. Allerdings bewegen sich diese Objekte ständig, so dass die in dieser Arbeit vorgestellten, auf statische Umgebungen ausgelegte Algorithmen nur in Spezialfällen akzeptable Ergebnisse liefern.

Für diese und viele weitere zukünftige Entwicklungen wurde mit dieser Arbeit der Boden bereitet. Die hier vorgestellten Methoden müssen in vielen Fällen nur konsequent weitergedacht und ergänzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] ABOUAF, JEFFREY: *Trial by Fire: Teleoperated Robot Targets Chernobyl*. IEEE Computer Graphics and Applications, 18(4):10–14, 1998.
- [2] ARCARA, PAOLO und CLAUDIO MELCHIORRI: *A Comparison of Control Schemes for Teleoperation with Time Delay*. In: *IFAC Telematics Applications in Automation*, Seiten 1–6, Weingarten, Deutschland, 2001.
- [3] BAIER, HUBERT: *Beiträge zur Steigerung der Wirklichkeitsnähe latenzbehafteter visueller und kinästhetischer Telepräsenz-Systeme*. Nummer 716 in *Fortschritt-Berichte Reihe 10: Informatik/Kommunikation*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [4] BAKKER, NIELS H., PETER J. WERKHOVEN und PETER O. PASSENIER: *Aiding Orientation Performance in Virtual Environments with Proprioceptive Feedback*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual Intl. Symposium*, Seiten 28–33, Atlanta, GA, USA, 1998.
- [5] BAKKER, NIELS H., PETER J. WERKHOVEN und PETER O. PASSENIER: *The Effects of Proprioceptive and Visual Feedback on Geographical Orientation in Virtual Environments*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(1):36–53, 1999.
- [6] BARBAGLI, FEDERICO, ALESSANDRO FORMAGLIO, MAX FRANZINI, ANTONELLO GIANNITRAPANI und DOMENICO PRATTICHIZZO: *Experimental Robotics IX*, Kapitel An Experimental Study of the Limitations of Mobile Haptic Interfaces. STAR (Springer Tracts on Advanced Robotics). Springer Verlag, Heidelberg, 2005.
- [7] BECKER, WOLFGANG, GREGORIOS NASIOS, SABINE RAAB und REINHART JÜRGENS: *Fusion of Vestibular and Podokinesthetic Information During Self-Turning Towards Instructed Targets*. *Experimental Brain Research*, 144(4):458–474, 2002.
- [8] BERGAMASCO, MASSIMO, BENEDETTO ALLOTTA, L. BOSIO, L. FERRETTI, G. PERRINI, G. M. PRISCO, F. SALSEDO und G. SARTINI: *An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environment Applications*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA '94)*, Seiten 1449–1454, San Diego, CA, USA, 1994.

- [9] BORRO, DIEGO, JOAN SAVALL, AIERT AMUNDARAIN, JORGE JUAN GIL, ALEJANDRO GARCÍA-ALONSO und LUIS MATEY: *A Large Haptic Device for Aircraft Engine Maintainability*. IEEE Computer Graphics and Applications, 24(6):70–74, 2004.
- [10] BOUGUILA, LAROUSI, MASAHIRO ISHII und MAKOTO SATO: *Multi-Modal Haptic Device for Large-Scale Virtual Environment*. In: *Proceedings of the 8th ACM Intl. Conference on Multimedia*, Seiten 277–283, Los Angeles, CA, USA, 2000.
- [11] BOWERSOX, JON C., AJIT SHAH, JOEL JENSEN, JOHN HILL, PAUL R. CORDTS und PHILIP S. GREEN: *Vascular Applications of Telepresence Surgery: Initial Feasibility Studies in Swine*. Journal of Vascular Surgery, 23(2):281–287, 1996.
- [12] BROGAN, DAVID C. und NICHOLAS L. JOHNSON: *Realistic Human Walking Paths*. In: *Computer Animation and Social Agents (CASA)*, Seiten 94–101, New Brunswick, NJ, USA, 2003.
- [13] BUNZ, CHRISTOPH, MICHAEL DEFLORIAN, CHRISTIAN HOFER, FLORIAN LAQUAI, MATTHIAS RUNGGER, FRANZ FREYBERGER und MARTIN BUSS: *Development of an Affordable Mobile Robot for Teleexploration*. In: *Proceedings of IEEE Mechatronics & Robotics (MechRob'04)*, Seiten 865–870, Aachen, Deutschland, 2004.
- [14] BURKERT, TIM, JAN LEUPOLD und GEORG PASSIG: *A Photorealistic Predictive Display*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 13(1):22–43, 2004.
- [15] BURNS, ERIC, SHARIF RAZZAQUE, ABIGAIL T. PANTER, MARY C. WHITTON, MATTHEW R. MCCALLUS und FREDERICK P. BROOKS, JR.: *The Hand Is More Easily Fooled than the Eye: Users Are More Sensitive to Visual Interpenetration than to Visual-Proprioceptive Discrepancy*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 15(1):1–15, 2006.
- [16] BUSS, MARTIN: *Mechatronics and Control Issues in Multi-Modal Telepresence*. In: *Proceedings of IEEE Mechatronics & Robotics (MechRob'04), Special Session on Telepresence and Teleaction*, Seiten 1463–1468, Aachen, Deutschland, 2004.
- [17] BUSS, MARTIN, MARTIN KUSCHEL, KWANG-KYU LEE, ANGELIKA PEER, BARTLOMIEJ STANCZYK, MARC UEBERLE und ULRICH UNTERHINNINGHOFEN: *High Fidelity Telepresence Systems: Design, Control, and Evaluation*. In: *Joint International COE/HAM-SFB453 Workshop on Human Adaptive Mechatronics and High-Fidelity Telepresence*, Tokio, Japan, 2006.
- [18] CHANCE, SARAH S., FLORENCE GAUNET und ANDREW C. BEALL: *Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel: The Contribution of Vestibular and Proprioceptive Inputs to Path Integration*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 7(2):168–178, 1998.
- [19] CHRISTENSEN, ROBERT R., JOHN M. HOLLERBACH, YANGMING XU und SANFORD G. MEEK: *Inertial-Force Feedback for the Treadport Locomotion Interface*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 9(1):1–14, 2000.

- [20] CLOVER, CHRIS L.: *A Control-System Architecture for Robots Used to Simulate Dynamic Force and Moment Interaction Between Humans and Virtual Objects*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 29(4):481–493, 1999.
- [21] CLOVER, CHRIS L., GREG R. LUECKE, JAMES J. TROY und WILLIAM A. MCNEELY: *Dynamic Simulation of Virtual Mechanisms with Haptic Feedback Using Industrial Robotics Equipment*. In: *Proceedings of the 1997 IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA '97)*, Seiten 724–730, Albuquerque, NM, USA, 1997.
- [22] CONGEDO, MARCO, ANATOLE LÉCUYER und EDOUARD GENTAZ: *The Influence of Spatial Delocation on Perceptual Integration of Vision and Touch*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 15(3):353–357, 2006.
- [23] CRUZ-NEIRA, CAROLINA, DANIEL J. SANDIN und THOMAS A. DEFANTI: *Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE*. In: *Proceedings of the 20th ACM Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 1993)*, Seiten 135–142, Anaheim, CA, USA, 1993.
- [24] DAPPER, MARCUS: *Kraftsensorlose Manipulator Kraftsteuerung zur Abtastung unbekannter, harter Oberflächen*. Nummer 1022 in *Fortschritt-Berichte Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [25] DARKEN, RUDOLPH P., TERRY ALLARD und LISA B. ACHILLE: *Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Spaces: An Introduction*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 7(2):101–107, 1998.
- [26] DARKEN, RUDOLPH P., TERRY ALLARD und LISA B. ACHILLE: *Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Spaces II*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 8(6):iii–vi, 1999.
- [27] DARKEN, RUDOLPH P., WILLIAM R. COCKAYNE und DAVID CARMEIN: *The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds*. In: *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST'97)*, Banff, Kanada, 1997.
- [28] DE LUCA, ALESSANDRO, RAFFAELLA MATTONE und PAOLO ROBUFFO GIORDANO: *Feedback/Feedforward Schemes for Motion Control of the CyberCarpet*. In: *Proceedings of 8th IFAC Symposium on Robot Control*, Bologna, Italien, 2006.
- [29] ETIENNE, ARIANE S., ROLAND MAURER und VAÉRIE SÉGUINOT: *Path Integration in Mammals and its Interaction With Visual Landmarks*. The Journal of Experimental Biology, 199(1):201–209, 1996.
- [30] FÖLLINGER, OTTO: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. Fachbücher zur Kybernetik. AEG-Telefunken, Berlin; Frankfurt am Main, 3. Auflage, 1980.

- [31] FONG, TERRENCE und CHARLES THORPE: *Vehicle Teleoperation Interfaces*. Autonomous Robots, 11(1):9–18, 2001.
- [32] FONG, TERRENCE, CHARLES THORPE und CHARLES BAUR: *Advanced Interfaces for Vehicle Teleoperation: Collaborative Control, Sensor Fusion Displays, and Remote Driving Tools*. Autonomous Robots, 11(1):77–85, 2001.
- [33] FORMAGLIO, ALESSANDRO, ANTONELLO GIANNITRAPANI, FEDERICO BARBAGLI, MAX FRANZINI und DOMENICO PRATTICHIZZO: *Performance of Mobile Haptic Interfaces*. In: *Proc. of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference 2005*, Seiten 8343–8348, Sevilla, Spanien, 2005.
- [34] GIBSON, JAMES J.: *Wahrnehmung und Umwelt – Der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung*. Urban&Schwarzenberg, München; Wien; Baltimore, 1. deutsche Auflage, 1982. Englischer Originaltitel: *The Ecological Approach to Visual Perception*.
- [35] GOLDSTEIN, E. BRUCE: *Wahrnehmungspsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; Berlin, 2. deutsche Auflage, 2002. Englischer Originaltitel: *Sensation and Perception*.
- [36] GOZA, S. MICHAEL, ROBERT O. AMBROSE, MYRON A. DIFTLER und I. M. SPAIN: *Telepresence Control of the NASA/DARPA Robonaut on a Mobility Platform*. In: *Proceedings of ACM International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2004)*, Seiten 623–629, Vienna, Austria, 2004.
- [37] GREGORY, RICHARD L.: *Auge und Gehirn – Psychologie des Sehens*. rororo Science. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck bei Hamburg, 1. deutsche Auflage, 2001. Englischer Originaltitel: *Eye and Brain. The Psychology of Seeing*.
- [38] HANEBECK, U. D., N. ŠALDIC und GÜNTHER SCHMIDT: *A Modular Wheel System for Mobile Robot Applications*. In: *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 17–22, Kjongju, Korea, 1999.
- [39] HANEBECK, UWE D., KAI BRIECHLE und ANDREAS RAUH: *Progressive Bayes: A New Framework for Nonlinear State Estimation*. In: *Proceedings of SPIE, AeroSense Symposium*, Band 5099, Seiten 256–267, Orlando, FL, USA, 2003.
- [40] HANEBECK, UWE D. und OLIVER C. SCHREMPF: *Stochastische Informationsverarbeitung*. Vorlesungsskript, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [41] HARRIS, L. R., M. JENKIN, D. ZIKOVITZ, F. REDLICK, P. JAEKL, U. JASIOBEDZKA, H. JENKIN und R. S. ALLISON: *Simulating Self Motion I: Cues for the Perception of Motion*. Virtual Reality, 6:75–85, 2002.
- [42] HARRIS, LAURENCE, MICHAEL JENKIN und DANIEL C. ZIKOVITZ: *Vestibular Cues and Virtual Environments*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual Intl. Symposium*, Seiten 133–138, Atlanta, GA, USA, 1998.

- [43] HASHTRUDI-ZAAD, KEYVAN und SEPTIMIU E. SALCUDEAN: *Analysis of Control Architectures for Teleoperation Systems with Impedance/Admittance Master and Slave Manipulators*. The International Journal of Robotics Research, 20(6):419–445, 2001.
- [44] HAYWARD, VINCENT: *Survey of Haptic Interface Research at McGill University*. In: *Proc. Workshop in Interactive Multimodal Telepresence Systems*, Seiten 91–98, München, Deutschland, 2001.
- [45] HIROSE, MICHITAKA, KOICHI HIROTA, TETSURO OGI, HIROAKI YANO, NAOYUKI KAKEHI, MAKOTO SAITO und MUTSUHIRO NAKASHIGE: *HapticGEAR: The Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR'01)*, Seiten 123–130, Yokohama, Japan, 2001.
- [46] HOLLERBACH, JOHN M.: *Some Current Issues in Haptics Research*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 757–762, San Francisco, CA, USA, 2000.
- [47] HOLLERBACH, JOHN M., WILLIAM B. THOMPSON und PETER SHIRLEY: *The Convergence of Robotics, Vision, and Computer Graphics for User Interaction*. The International Journal of Robotics Research, 18(11):1088–1100, 1999.
- [48] HOLLERBACH, JOHN M., YANGMING XU, ROBERT R. CHRISTENSEN und STEPHEN C. JACOBSEN: *Design Specifications for the Second Generation Sarcos Treadport Locomotion Interface*. In: *Haptics Symposium, Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 69-2*, Seiten 1293–1298, Orlando, FL, USA, 2000.
- [49] HOOGEN, JENS und GÜNTHER SCHMIDT: *Experimental Results in Control of an Industrial Robot Used as a Haptic Interface*. In: *IFAC Telematics Applications in Automation and Robotics*, Seiten 169–174, Weingarten, Deutschland, 2001.
- [50] HUANG, JIUNG-YAO: *An Omnidirectional Stroll-Based Virtual Reality Interface and Its Application on Overhead Crane Training*. IEEE Transactions on Multimedia, 5(1):39–51, 2003.
- [51] HURMUZLU, YILDIRIM, ANTON EPHANOV und DAN STOIANOVICI: *Effect of a Pneumatically Driven Haptic Interface on the Perceptual Capabilities of Human Operators*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 7(3):290–307, 1998.
- [52] IWATA, HIROO: *The Torus Treadmill: Realizing Locomotion in VEs*. IEEE Computer Graphics and Applications, 19(6):30–35, 1999.
- [53] IWATA, HIROO: *Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, Seiten 286–293, Houston, TX, USA, 1999.
- [54] IWATA, HIROO, HIROAKI YANO, HIROYUKI FUKUSHIMA und HARUO NOMA: *CircularFloor*. IEEE Computer Graphics and Applications, 25(1):64–67, 2005.

- [55] IWATA, HIROO, HIROAKI YANO und FUMITAKA NAKAIZUMI: *Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, Seiten 131–137, Yokohama, Japan, 2001.
- [56] IWATA, HIROO und YOKO YOSHIDA: *Path Reproduction Tests Using a Torus Treadmill*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 8(6):587–597, 1999.
- [57] JAEKL, P. M., M. R. JENKIN und LAURENCE R. HARRIS: *Perceiving a Stable World During Active Rotational and Translational Head Movements*. Experimental Brain Research, 163(3):388–399, 2005.
- [58] JEONG, YOUNKOO, DONGJOON LEE, KYUNGHWAN KIM und JONGOH PARK: *A Wearable Robotic Arm with High Force-Reflection Capability*. In: *Proceedings of IEEE Intl. Workshop on Robot-Human Interaction (ROMAN2000)*, Seiten 411–416, Osaka, Japan, 2000.
- [59] JUL, SUSANNE und GEORGE W. FURNAS: *Navigation in Electronic Worlds*. SIGCHI Bulletin, 29(4):44–49, 1997.
- [60] KAMMERMEIER, PETER, ALEXANDER KRON, JENS HOOGEN und GÜNTHER SCHMIDT: *Display of Holistic Haptic Sensations by Combined Tactile and Kinesthetic Feedback*. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 13(1):1–15, 2004.
- [61] KHATIB, OUSSAMA: *Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA'85)*, Seiten 500–505, St. Louis, MS, USA, 1985.
- [62] KLATZKY, ROBERTA L., YVONNE LIPPA, JACK M. LOOMIS und REGINALD G. GOLLEDGE: *Encoding, Learning, and Spatial Updating of Multiple Object Locations Specified by 3-D Sound, Spatial Language, and Vision*. Experimental Brain Research, 149(1):48–61, 2003.
- [63] KOHLI, LUV, ERIC BURNS, DORIAN MILLER und HENRY FUCHS: *Combining Passive Haptics with Redirected Walking*. In: *Proceedings of the 15th Intl. Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, Christchurch, Neuseeland, 2005.
- [64] KRON, ALEXANDER, MARTIN BUSS und GÜNTHER SCHMIDT: *Exploration and Manipulation of Virtual Environments Using a Combined Hand and Finger Force Feedback System*. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'00)*, Seiten 1328–1333, Tsukuba, Japan, 2000.
- [65] KÜNZLER, URS und CHRISTOPH RUNDE: *Kinesthetic Haptics Integration into Large-Scale Virtual Environments*. In: *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05)*, Seiten 551–556, Pisa, Italien, 2005.
- [66] LAVIOLA JR., JOSEPH J.: *A Discussion of Cybersickness in Virtual Environments*. SIGCHI Bulletin, 32(1):47–56, 2000.

- [67] LAVIOLA JR., JOSEPH J., DANIEL ACEVEDO FELIZ, DANIEL F. KEEFE und ROBERT C. ZELEZNIK: *Hands-Free Multi-Scale Navigation in Virtual Environments*. In: *Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics*, Seiten 9–15, Research Triangle Park, NC, USA, 2001.
- [68] LAYER, MARC: *Dynamische Pfadkrümmungsverfahren zur Abbildung ausgedehnter virtueller Umgebungen auf begrenzte Räume*. Interdisziplinäres Projekt, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München, unveröffentlicht, 2002.
- [69] LEE, KWAN MIN: *Why Presence Occurs: Evolutionary Psychology, Media Equation, and Presence*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 13(4):494–505, 2004.
- [70] LEIBOWITZ, HERSCHEL W., CHRIS A. JOHNSON und EDMUND ISABELLE: *Peripheral Motion Detection and Refractive Error*. *Science*, 177(4055):1207–1208, 1972.
- [71] LIN, JENG-WEEI JAMES: *Enhancement of User-Experiences in Immersive Virtual Environments that Employ Wide-Field Displays*. Doktorarbeit, University of Washington, Seattle, WA, USA, 2004.
- [72] LOOMIS, JACK M., ROBERTA L. KLATZKY, REGINALD G. GOLLEDGE und JOHN. W. PHILBECK: *Human Navigation by Path Integration*. In: GOLLEDGE, REGINALD G. (Herausgeber): *Wayfinding Behavior: Cognitive Mapping and Other Spatial Processes*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, USA, 1999.
- [73] LUNA, NANCY: *Robot a New Face on Geriatric Care*. *The Orange County Register*, 2003.
- [74] MERGNER, THOMAS, CHRISTOPH W. SIEBOLD, GEORG SCHWEIGART und WOLFGANG BECKER: *Human Perception of Horizontal Trunk and Head Rotation in Space During Vestibular and Neck Stimulation*. *Experimental Brain Research*, 85(2):389–404, 1991.
- [75] MITSUDA, TAKASHI, SACHIKO KUGE, MASATO WAKABAYASHI und SADA O KAWAMURA: *Wearable Force Display Using a Particle Mechanical Constraint*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 11(6):569–577, 2002.
- [76] NITZSCHE, NORBERT: *Weiträumige Telepräsenz: Unbeschränkte Fortbewegung und haptische Interaktion*. Nummer 1095 in *Fortschritt-Berichte Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2006.
- [77] NITZSCHE, NORBERT, UWE D. HANEBECK und GÜNTHER SCHMIDT: *Extending Telepresent Walking by Motion Compression*. In: *1. SFB-Aussprachetag Human Centered Robotic Systems (HCRS'02)*, Seiten 83–90, Karlsruhe, Deutschland, 2002.
- [78] NITZSCHE, NORBERT, UWE D. HANEBECK und GÜNTHER SCHMIDT: *Mobile haptische Schnittstellen für weiträumige Telepräsenz: Idee und Methodik*. *at Automatisierungstechnik*, 51(1):5–12, 2003.

- [79] NITZSCHE, NORBERT, UWE D. HANEBECK und GÜNTHER SCHMIDT: *Motion Compression for Telepresent Walking in Large-Scale Remote Environments*. In: *Proceedings of SPIE, Vol. 5079, AeroSense Symposium*, Seiten 265–276, Orlando, FL, USA, 2003.
- [80] NITZSCHE, NORBERT, UWE D. HANEBECK und GÜNTHER SCHMIDT: *Motion Compression for Telepresent Walking in Large Target Environments*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 13(1):44–60, 2004.
- [81] NITZSCHE, NORBERT und GÜNTHER SCHMIDT: *A Mobile Haptic Interface Mastering a Mobile Teleoperator*. In: *Proceedings of IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004.
- [82] PEER, ANGELIKA, ULRICH UNTERHINNINGHOFEN und MARTIN BUSS: *Tele-Assembly in Wide Remote Environments*. In: *Proceedings of Second International Workshop on Human Centered Robotic Systems (HCRS'06)*, München, Deutschland, 2006.
- [83] PREUSCHE, C., D. REINTSEMA, K. LANDZETTEL, M. FISCHER und G. HIRZINGER: *DLR on the Way towards Telepresent On-Orbit Servicing*. In: *Proceedings of IEEE Mechatronics & Robotics (MechRob'04), Special Session on Telepresence and Teleaction*, Seiten 1478–1483, Aachen, Deutschland, 2004.
- [84] PRITSCHOW, GÜNTHER und TANG-LONG TRAN: *Parallel Kinematics and PC-Based Control Systems for Machine Tools*. In: *Proceedings of the 37th IEEE Intl. Conference on Decision and Control (CDC'98)*, Seiten 2605–2610, Tampa, FL, USA, 1998.
- [85] RAZZAQUE, SHARIF: *Redirected Walking*. Doktorarbeit, University of Northern Carolina at Chappel Hill, Chappel Hill, NC, USA, 2005.
- [86] RAZZAQUE, SHARIF, ZACHARIAH KOHN und MARY C. WHITTON: *Redirected Walking*. In: *Proceedings of Eurographics*, Manchester, UK, 2001.
- [87] RAZZAQUE, SHARIF, DAVID SWAPP, MEL SLATER, MARY C. WHITTON und ANTHONY STEED: *Redirected Walking in Place*. In: *Proceedings of Eurographics Workshop on Virtual Environments*, Seiten 123–130, Barcelona, Spanien, 2002.
- [88] RICHARD, CHRISTOPHER und MARK R. CUTKOSKY: *Contact Force Perception with an Ungrounded Haptic Interface*. In: *ASME IMECE 6th Annual Symposium on Haptic Interfaces*, Dallas, TX, USA, 1997.
- [89] RIECKE, BERNHARD E.: *How Far Can We Get With Just Visual Information? Path Integration and Spatial Updating Studies in Virtual Reality*. Doktorarbeit, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Tübingen, Deutschland, 2003.
- [90] RIMON, ELON und DANIEL E. KODITSCHKEK: *The Construction of Analytic Diffeomorphisms for Exact Robot Navigation on Star Worlds*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA'89)*, 21–26, Scottsdale, AZ, USA, 1989.

- [91] RUSHTON, SIMON K., JULIE M. HARRIS, MAUGAN R. LLOYD und JOHN P. WANN: *Guidance of Locomotion on Foot Uses Perceived Target Location Rather than Optic Flow*. *Current Biology*, 22(8):1191–1194, 1998.
- [92] RYBSKI, PAUL E., IAN BURT, TOM DAHLIN, MARIA GINI, DEAN F. HOUGEN, DONALD G. KRANTZ, FLORENT NAGEOTTE, NIKOLAOS PAPANIKOLOPOULOS und SASSCHA A. STOETER: *System Architecture for Versatile Autonomous and Teleoperated Control of Multiple Miniature Robots*. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA'01)*, Seoul, Korea, 2001.
- [93] SCHREMPF, OLIVER C., DAVID ALBRECHT und UWE D. HANEBECK: *Tractable Probabilistic Models for Intention Recognition Based on Expert Knowledge*. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, San Diego, CA, USA, 2007.
- [94] SCHUBERT, THOMAS, FRANK FRIEDMANN und HOLGER REGENBRECHT: *Embodied Presence in Virtual Environments*. In: *Proceedings of Visual Representations and Interpretations (VRI '98)*, Liverpool, England, 1998.
- [95] SCHWAIGER, MARTIN, HEINZ ULBRICH und THOMAS THÜMMEL: *A Foot Following Locomotion Device with Force Feedback Capabilities*. In: *Proceedings of VIII Symposium on Virtual Reality*, Seiten 309–321, Belem, Brasilien, 2006.
- [96] SLATER, MEL, MARTIN USOH und ANTHONY STEED: *Steps and Ladders in Virtual Reality*. In: *ACM Proceedings of VRST '94 - Virtual Reality Software and Technology*, Seiten 45–54, 1994.
- [97] SLATER, MEL, MARTIN USOH und ANTHONY STEED: *Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality*. *ACM Transactions on Computer-Human Interface, Special Issue on Virtual Reality Software and Technology*, 2(3):201–219, 1995.
- [98] STEMMER, RALF, ROLAND BROCKERS, SIEGBERT DRÜE und JÖRG THIEM: *Comprehensive Data Acquisition for a Telepresence Application*. In: *Proceedings of Systems, Man, and Cybernetics*, Seiten 5344–5349, Den Haag, Die Niederlande, 2004.
- [99] STEUER, JONATHAN: *Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence*. *Journal of Communication*, 42(4):73–93, 1992.
- [100] SU, JIANBO und ZHIWEI LUO: *Incremental Motion Compression for Telepresent Walking Subject to Spatial Constraints*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*, Seiten 69–74, Barcelona, Spanien, 2005.
- [101] SUTHERLAND, IVAN E.: *The Ultimate Display*. In: *Proceedings of the IFIP Congress*, Band 2, Seiten 506–508, New York, NY, USA, 1965.

- [102] TANAKA, YOKICHI, SAKAI MASATAKA, KOHNO YUKA, YUKIO FUKUI, JULI YAMASHITA und NORIO NAKAMURA: *Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of Human Palm*. In: *Proceedings of the Intl. Conference on Artificial Intelligence and Telexistence (ICAT 2001)*, Seiten 115–120, Tokio, Japan, 2001.
- [103] TARR, MICHAEL J. und WILLIAM H. WARREN: *Virtual Reality in Behavioral Neuroscience and Beyond*. *Nature Neuroscience Supplement*, 5:1089–1092, 2002.
- [104] TEMPLEMAN, JAMES N., PATRICIA S. DENBROOK und LINDA E. SIBERT: *Virtual Locomotion: Walking in Place Through Virtual Environments*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(6):598–617, 1999.
- [105] UEBERLE, MARC, NICO MOCK und MARTIN BUSS: *Towards a Hyper-Redundant Haptic Display*. In: *Proceedings of the International Workshop on High-Fidelity Telepresence and Teleaction, jointly with the IEEE conference HUMANOIDS 2003*, München, Deutschland, 2003.
- [106] UNGER, B. J., ROBERTA L. KLATZKY und RALPH L. HOLLIS: *Teleoperation Mediated through Magnetic Levitation: Recent Results*. In: *Proceedings of IEEE Mechatronics & Robotics (MechRob'04), Special Session on Telepresence and Teleaction*, Seiten 1458–1462, Aachen, Deutschland, 2004.
- [107] VAN DEN DOEL, KEES und DINESH K. PAI: *Performance Measures for Robot Manipulators: A Unified Approach*. *The International Journal of Robotics Research*, 15(1):92–111, 1996.
- [108] YANO, HIROAKI, MASAYUKI YOSHIE und HIROO IWATA: *Development of a Non-grounded Haptic Interface Using the Gyro Effect*. In: *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, Seiten 32–39, Los Angeles, CA, USA, 2003.
- [109] YOKOKOHI, YASUYOSHI, RALPH L. HOLLIS und TAKEO KANADE: *WYSIWYF Display: A Visual/Haptic Interface to Virtual Environment*. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(4):412–434, 1999.
- [110] YOON, JUNGWON und JEHA RYU: *Walking Control of a Dual-Planar Parallel Robot for Omni-directional Locomotion Interface*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Edmonton, AB, Kanada, 2005.
- [111] YOSHIKAWA, TSUNEO: *Manipulability and Redundancy Control of Robotic Mechanisms*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation (ICRA'85)*, Seiten 1004–1009, 1985.
- [112] ZLAJPAH, LEON: *Dexterity Measures for Optimal Path Control of Redundant Manipulators*. In: *Proceedings of 5th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, 85–90, 1996.

Betreute Studien- und Diplomarbeiten

- [113] ARMSTRONG, TIMOTHY: *Hardwareabstraktion in einer verteilten Steuerungselektronik*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), März 2006. Betreuer: Patrick Rößler.
- [114] HAUTH, ANJA: *Stochastische Erkennung von Wegpunkten bei weiträumiger Bewegung*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), September 2005. Betreuer: Patrick Rößler.
- [115] HAUTH, TOBIAS: *Video-Streaming für Telepräsenz Anwendungen*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), Januar 2006. Betreuer: Patrick Rößler.
- [116] HESSEL, OLIVER: *Konzeption einer großen haptischen Schnittstelle für die weiträumige Telepräsenz*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), März 2006. Betreuer: Patrick Rößler.
- [117] MAYER, SVEN: *Geregelte Bewegungskompression für die weiträumige Telepräsenz*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), Mai 2004. Betreuer: Patrick Rößler.
- [118] MENDE, MICHAEL: *Eine verteilte Steuerungselektronik für eine große haptische Schnittstelle*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), März 2006. Betreuer: Patrick Rößler.
- [119] MEYER, JOHANNES: *Evaluierung von Salienzkarten zur Erkennung möglicher Ziele in der weiträumigen Telepräsenz*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), September 2005. Betreuer: Patrick Rößler.
- [120] PACKI, FERDINAND: *Darstellung definierter Kräfte aus einer Telepräsenzumgebung auf einer großen haptischen Schnittstelle*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), Dezember 2007. Betreuer: Antonia Pérez Arias und Patrick Rößler.
- [121] STOLL, MICHAEL: *Aufbau eines Systems zum Stereo-Telehören*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme, Universität Karlsruhe (TH), Mai 2006. Betreuer: Patrick Rößler.

Eigene Veröffentlichungen

- [122] GROENDA, HENNING, FABIAN NOWAK, PATRICK RÖSSLER und UWE D. HANEBECK: *Telepresence Techniques for Controlling Avatar Motion in First Person Games*. In: M. MAYBURY, O. STOCK, G. WAHLSTER (Herausgeber): *Intelligent Technologies for Interactive Entertainment (INTETAIN 2005)*, Madonna Di Campiglio, Italien, Band 3814 der Reihe *Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, Seiten 45–53. Springer Verlag, Heidelberg, 2005.
- [123] RÖSSLER, PATRICK, TIMOTHY ARMSTRONG, OLIVER HESSEL, MICHAEL MENDE und UWE D. HANEBECK: *A Novel Haptic Interface for Free Locomotion in Extended Range Telepresence Scenarios*. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2006)*, Seiten 148–153, Setubal, Portugal, 2006.
- [124] RÖSSLER, PATRICK, FREDERIK BEUTLER und UWE D. HANEBECK: *A Framework for Telepresent Game-Play in Large Virtual Environments*. In: *2nd Intl. Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2005)*, Band 3, Seiten 150–155, Barcelona, Spanien, 2005.
- [125] RÖSSLER, PATRICK, FREDERIK BEUTLER, UWE D. HANEBECK und NORBERT NITZSCHE: *Motion Compression Applied to Guidance of a Mobile Teleoperator*. In: *Proceedings of the IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Seiten 2495–2500, Edmonton, AB, Kanada, 2005.
- [126] RÖSSLER, PATRICK und UWE D. HANEBECK: *Telepresence Techniques for Exception Handling in Household Robots*. In: *IEEE Intl. Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'04)*, Seiten 53–58, Den Haag, Die Niederlande, 2004.
- [127] RÖSSLER, PATRICK und UWE D. HANEBECK: *Simultaneous Motion Compression for Multi-User Extended Range Telepresence*. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'06)*, Beijing, China, 2006.
- [128] RÖSSLER, PATRICK, UWE D. HANEBECK, MARIAN GRIGORAS, PAUL T. PILGRAM, JOACHIM BAMBERGER und CLEMENS HOFFMANN: *Automatische Kartographierung der Signalcharakteristik in Funknetzwerken*. In: R. DILLMANN, T. GOCKEL, H. WÖRN (Herausgeber): *Autonome Mobile Systeme 2003 (AMS'03)*, 18. Fachgespräch, Karlsruhe, Informatik aktuell, Seiten 201–213. Springer Verlag, Heidelberg, 2003.

- [129] RÖSSLER, PATRICK, UWE D. HANEBECK und NORBERT NITZSCHE: *Feedback Controlled Motion Compression for Extended Range Telepresence*. In: *Proceedings of IEEE Mechatronics & Robotics (MechRob'04), Special Session on Telepresence and Teleaction*, Seiten 1447–1452, Aachen, Deutschland, 2004.
- [130] RÖSSLER, PATRICK, OLIVER C. SCHREMPF und UWE D. HANEBECK: *Stochastic Prediction of Waypoints for Extended Range Telepresence Applications*. In: *Proceedings of Second International Workshop on Human Centered Robotic Systems (HCRS'06)*, München, Deutschland, 2006.

In dieser Arbeit wird ein System zur weiträumigen Telepräsenz vorgestellt, das wirklichkeitsnahe Exploration und Manipulation in ausgedehnten entfernten Umgebungen erlaubt.

Weiträumige Bewegung wird dadurch realisiert, dass sich der menschliche Benutzer durch natürliches Gehen fortbewegt. Dabei werden seine Kopfbewegungen aufgezeichnet und an ein mobiles Robotersystem, den Teleoperator, in der Zielumgebung übertragen, das diese Bewegungen repliziert. Über ein Head-Mounted-Display bekommt der Benutzer die Live-Bilder eines auf dem Teleoperator angebrachten Stereo-Kamerasystems dargestellt. So sieht er die Zielumgebung aus der Perspektive des Teleoperators und taucht in diese ein. Durch das Verfahren der Bewegungskompression, das in dieser Arbeit substantiell erweitert wird, können beliebig große Zielumgebungen aus beschränkten Umgebungen heraus exploriert werden.

Um dem Benutzer bei Manipulationsaufgaben eine haptische Rückkopplung zu bieten, steht er in direktem Kontakt mit einer haptischen Schnittstelle, einem Robotersystem, das die in der Zielumgebung auf den Teleoperator wirkenden Kräfte an der Hand des Benutzers darstellt.