PAMM · Proc. Appl. Math. Mech. **6**, 141–142 (2006) / **DOI** 10.1002/pamm.200610051

Kinematik und Dynamik aus experimentell ermittelten Bewegungen

Günther Stelzner* und **Wolfgang Seemann****

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Thema dieser Arbeit ist die Generierung von kinematischen Simulationsmodellen des Menschen aus experimentell ermittelten Motion-Capture-Daten. Ausgehend von den Absolutkoordinaten sogenanter Markerpunkte sind die Rekonstruktion der menschlichen Kinematik und die Projektion der menschlichen Bewegungsmuster auf die ermittelten Starrkörpermodelle Kernpunkt dieser Arbeit. Besonderes Augenmerk ist dabei stets auf eine möglichst einfache Kinematik gerichtet, die aber noch die wesentlichen Merkmale der menschlichen Bewegung reproduzieren kann.

1 Einleitung

Das Leben des Menschen wird zunehmend von Maschinen geprägt, die mittlerweile einen großen Teil seiner handwerklichen Tätigkeiten übernommen haben oder ihn dabei unterstützen. Die rasante Entwicklung im Bereich der Regelungstechnik und Informatik erlaubt es heute, Roboter zu entwickeln, die autonom mit dem Menschen interagieren können. Der Einsatz als Haushaltshilfe ist damit durchaus denkbar. Damit der Roboter vom Menschen als ein hilfreicher Assistent empfunden wird, sollte er über eine humanoide Gestalt mit den gleichen kinematischen Möglichkeiten und Beschränkungen verfügen wie der Mensch. Das Bewegungssystem und damit das Verhalten des Roboters sollen auf menschenähnliche Bewegungen zugeschnitten sein. Um die Grundidee erfolgreich zu verwirklichen, Serviceroboter mit humanoider Gestalt und Kinematik zu entwickeln, müssen die als Vorbild dienenden Basisbewegungen des Menschen untersucht und verstanden werden. Dazu sollen menschliche Simulationsmodelle einen Beitrag leisten. Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist demzufolge die Generierung von virtuellen Menschmodellen auf der Grundlage von Messdaten. Ferner sind die wichtigsten Charakteristiken der menschlichen Bewegung zu identifizieren und auf technisch realisierbare Starrkörpersysteme zu übertragen.

2 Biomechanische Modellierung und Datenerfassung

Der menschliche Körper ist aus mechanischer Sicht ein System mit weit über 100 Gelenken mit einer Vielzahl von Freiheitsgraden. Aufgrund dieser Komplexität sind Approximationen bei der Modellierung unumgänglich. In der biomechanischen Modellierung des menschlichen Körpers hat es sich daher vielfach bewährt, die Körperteile durch starre Körper zu beschreiben, die über ideale Gelenke miteinander verbunden sind. Die komplexe Ganzkörperbewegung des menschlichen Körpers wird ausreichend genau durch diesen Starrkörperansatz reproduziert. Für die korrekte biomechanische Modellierung werden die signifikanten kinematischen Eigenschaften des Körpers, d.h. die Segmentierung, die Segmentlängen, die Gelenktypen, die Gelenkpositionen auf den Segmenten, benötigt. Grundsätzlich sind vor allem die inneren anthropometrischen Daten schwer zu ermitteln. Hinzu kommt, dass die Daten in der Regel stark interindividuell variieren. Aus diesem Grund sind Modelle erforderlich, mit denen durch äußere Merkmale auf die Werte der inneren Größen geschlossen werden kann. Eine gängige Methode menschliche Bewegungen zu untersuchen ist die optische Motion-Capture-Technik. Dabei werden die Trajektorien ausgewählter Körperpunkte (Markerpunkte) mit Hilfe von Kameras erfasst. Die Anzahl der Körper, die Zuordnung Marker - Starrkörper und damit die Topologie des Modells wird schon bei der Datenerfassung durch die Anzahl und die Positionen der ausgewählten Markerpunkte festgelegt. Ausgehend von den Absolutkoordinaten dieser Markerpunkte ist die Rekonstruktion der menschlichen Kinematik zu vollziehen.

3 Kinematisches Menschmodell

Die Anzahl der Freiheitsgrade, die Gelenktypen und die Geometrie der einzelnen Segmente haben einen entscheidenden Einfluss auf den humanoiden Charakter des Modells. Deshalb ist eine einfach realisierbare Kinematik gesucht, die menschliche Bewegungsmuster möglichst gut abbilden kann. Zentrales Problem dabei ist, wie sich die ermittelten charakteristischen Bewegungsmuster des Menschen auf eine Kinematik mit wesentlich geringerer Anzahl an Freiheitsgraden abbilden lassen.

* e-mail: stelzner@itm.uni-karlsruhe.de
** e-mail: seemann@itm.uni-karlsruhe.de

3.1 Lage und Orientierung der Starrkörper

Gegeben seien zu diskreten Zeitpunkten t die Koordinaten $\mathbf{R}_{ik}(t)$ der $i = 1, \ldots, n$ Markerpunkte, die dem Körper k zugeordnet sind. Die allgemeine räumliche Bewegung des Korpers k bzw. des damit fest verbundenen Koordinatensystems K_k relativ zum Absolutsystem K_0 lässt sich durch die zeitlich veränderlichen Absolutkoordinaten des körperfesten Punkts $\mathbf{R}_k(t)$ und durch die zeitlich veränderliche Transformationsmatrix $\mathbf{A}_{0k}(t)$ darstellen. Als körperfester Bezugspunkt wird zweckmäßig der Mittelpunkt $\mathbf{R}_k(t)$ gewählt, der sich aus den Absolutkoordinaten der Markerpunkte $\mathbf{R}_{ik}(t)$ eindeutig über die Beziehung $\mathbf{R}_k(t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathbf{R}_{ik}(t)$ berechnen lässt. Nur drei der neun Elemente der Transformationsmatrix $\mathbf{A}_{0k}(t)$ sind voneinander unabhängig, entsprechend den drei Freiheitsgraden der freien Drehbewegung im Raum. Die Transformationsmatrix kann somit in Abhängigkeit von drei unabhängigen Koordinaten des Rodriguez-Vektors $\mathbf{s}_{0k}(t)$ dargestellt werden. Mit der schiefsymmetrischen Matrix $\tilde{\mathbf{s}}_{0k}(t)$ und der Einheitsmatrix $\mathbf{I}$ gilt der Zusammenhang $\mathbf{A}_{0k}(t) = (\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{s}}_{0k}(t))^{-1}(\mathbf{I} + \tilde{\mathbf{s}}_{0k}(t))$. Für die Berechnung des Rodriguez-Vektors $\mathbf{s}_{0k}(t)$ aus den Absolutkoordinaten der Markerpunkte $\mathbf{R}_{ik}(t)$ lässt sich nun ein Optimierungsproblem $\sum_{i=1}^{n}\|\mathbf{r}_{ik}(t) - \mathbf{r}_{ik}(t_0) + (\mathbf{r}_{ik}(t) + \mathbf{r}_{ik}(t_0)) \times \mathbf{s}_{0k}(t)\|^2 = \min$ formulieren. Dabei gilt $\mathbf{r}_{ik}(t) = \mathbf{R}_{ik}(t) - \mathbf{R}_k(t)$. Damit ist die Absolutbewegung der Starrkörper bestimmt. Während die Ermittlung der Lage immer eindeutig ist, lässt sich die Orientierung der Starrkörper für $n < 3$ oder bei kollinear angeordneten Markern nicht eindeutig bestimmen.

3.2 Gelenke

Der nächste Schritt besteht darin, zur Relativbewegung der einzelnen Starrkörper passende Gelenke zu finden, d.h. die Reduktion der Freiheitsgrade durch Hinzufügen von impliziten Gelenkbindungen. Gesucht sind also die konstanten Gelenkparameter, die eine vollständige Beschreibung der Kinematik erlauben.

3.2.1 Beispiel: Drehgelenk

Gegeben seien zu diskreten Zeitpunkten t_n die Absolutkoordinaten $\mathbf{R}_k(t_n)$ bzw. $\mathbf{R}_l(t_n)$ und die Transformationsmatrizen $\mathbf{A}_{0k}(t_n)$ bzw. $\mathbf{A}_{0l}(t_n)$ der beiden Starrkörper k bzw. l. Die relative Lage der körperfesten Gelenkkoordinatensysteme K_i bzw. K_j bezüglich K_k bzw. K_l sei durch die Koordinaten der körperfesten Vektoren $\bar{\mathbf{c}}_{kl}$ und $\bar{\mathbf{c}}_{lk}$ beschrieben. Aus den kinematischen Bindungsgleichungen lässt sich ein lineares Optimierungsproblem über N diskrete Zeitpunkte formulieren: $\sum_{n=1}^{N}\|\mathbf{R}_k(t_n) + \mathbf{A}_{0k}(t_n)\bar{\mathbf{c}}_{kl} - \mathbf{R}_l(t_n) - \mathbf{A}_{0l}(t_n)\bar{\mathbf{c}}_{lk}\|^2 = \min$. Die Lösung des Optimierungsproblems liefert somit die relative Lage des Drehgelenks $\bar{\mathbf{c}}_{kl}$ und $\bar{\mathbf{c}}_{lk}$. Legt man die Drehachse in Richtung der $\mathbf{e}_z$-Achse und beschreibt die relative Orientierung der Gelenkkoordinatensysteme K_i bzw. K_j durch die sechs Kardanwinkel $\alpha_{ki}, \beta_{ki}, \gamma_{ki}$ bzw. $\alpha_{lj}, \beta_{lj}, \gamma_{lj}$, so lauten die entsprechenden Bindungen $(\mathbf{e}_z^i)^T\mathbf{e}_x^j = 0$ und $(\mathbf{e}_z^i)^T\mathbf{e}_y^j = 0$. Damit lässt sich die Orientierung der Gelenkachse aus folgendem Optimierungsproblem bestimmen:

$$\sum_{n=1}^{N}\left\|\left[\begin{array}{c}(\mathbf{A}_{0k}(t_n)\mathbf{A}_{ki}(\alpha_{ki}, \beta_{ki}, \gamma_{ki})\bar{\mathbf{e}}_z^i)^T(\mathbf{A}_{0l}(t_n)\mathbf{A}_{lj}(\alpha_{lj}, \beta_{lj}, \gamma_{lj})\bar{\mathbf{e}}_x^j)\\(\mathbf{A}_{0k}(t_n)\mathbf{A}_{ki}(\alpha_{ki}, \beta_{ki}, \gamma_{ki})\bar{\mathbf{e}}_z^i)^T(\mathbf{A}_{0l}(t_n)\mathbf{A}_{lj}(\alpha_{lj}, \beta_{lj}, \gamma_{lj})\bar{\mathbf{e}}_y^j)\end{array}\right]\right\|^2 = \min\,.$$

3.3 Konsistente Kinematik in Minimalkoordinaten

Die Bestimmung der Modellparameter mit den o.g. Optimierungskriterien führt bei der Projektion der gemessenen Bewegung zunächst auf ein inkonsistentes Modellverhalten. Die Gelenkbindungen sind nicht exakt erfüllt, sondern erfüllen nur die geforderten Minimierungskriterien. Für die Formulierung der Kinematik bestehen nun zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Bewegungsgleichungen in voneinander abhängigen Absolutkoordinaten erfordern die Verwendung von impliziten Bindungen [2], wie oben dargestellt. Diese Vorgehensweise führt im vorliegendem Fall auf die Notwendigkeit, die Absolutkoordinaten im Hinblick auf kinematische Konsistenz zu korrigieren. In der vorliegenden Arbeit wird der Übergang auf voneinander unabhängige Minimalkoordinaten $\mathbf{q}(t)$ vollzogen und somit auf Bindungen in expliziter Form [3]. Die Übertragung der gemessenen Bewegung bedeutet somit die Berechnung der noch unbekannten Gelenkkoordinaten $\mathbf{q}(t)$ bei kinematischer Führung ausgewählter Referenzpunkte. Dies erfolgt wieder mit Hilfe eines Optimierungsproblems [1] in der Form $\sum_{b=1}^{n_B}\|\varepsilon_b\|^2 = \min$. Seien z.B. $\mathbf{P}_b(t)$ der Absolutkoordinatenvektor eines beliebigen Markerpunktes und $\mathbf{R}_b(\mathbf{q}(t))$ die Koordinaten des entsprechenden Referenzpunktes auf dem Starrkörpermodell, dann bezeichnet $\varepsilon_b = \mathbf{P}_b(t) - \mathbf{R}_b(\mathbf{q}(t))$ das Residuum der Bindung auf Lageebene. Analoges gilt für die Orientierung. Mit der Kenntnis der Gelenkkoordinatenverläufe $\mathbf{q}(t)$ ist die Projektion der gemessenen Bewegung auf das Starrkörpermodell vollzogen (Beispiele unter http:\\www.itm.uni-karlsruhe.de\sfb588).

Danksagung Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Projekte M4 innerhalb des Sonderforschungsbereichs 588 *Humanoide Roboter Lernende und kooperierende multimodale Roboter* unterstützt.

Literatur

[1] C.T. Kelley, Iterative Methods for Optimization, (SIAM, 1999)
[2] A. A. Shabana, Computational Dynamics, 2nd Ed., (J. Wiley & Sons, New York, 2001).
[3] J. Wittenburg, Dynamics of Systems of Rigid Bodies, (B.G. Teubner Stuttgart 1977).