

Datenfusion zur Gewinnung hochwertiger Bilder am Beispiel der Kriminaltechnik

J. Beyerer und F. Puente León

Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Postfach 6980, 76128 Karlsruhe

Es werden Bildfusionsverfahren vorgestellt, die eine Erfassung von Projektilen und Patronenhülsen erlauben. Zuerst wird auf Probleme eingegangen – Beleuchtung, Schärfentiefe und Sichtbarkeit – aufgrund derer optische Systeme bei der Erfassung hinreichend guter Bildern oftmals versagen. In allen Fällen werden die damit einhergehenden Beschränkungen dadurch kompensiert, daß Bildserien erfaßt und diese mit Hilfe von geeigneten Datenfusionsverfahren zu einem verbesserten Ergebnis kombiniert werden.

1 Einleitung

Bei der automatischen Sichtprüfung metallischer Oberflächen räumlicher Objekte bereitet die Bilderfassung verschiedene Schwierigkeiten:

- wegen der Reflektanz und der Struktur der Oberfläche hängt das Grauwertbild stark vom lokalen Beleuchtungswinkel ab,
- die Auflösung feiner Details der Oberfläche bedingt eine geringe Schärfentiefe,
- perspektivische Verzerrungen treten auf, und bestimmte Bereiche werden verdeckt.

Defizite der Bilddaten infolge dieser Schwierigkeiten lassen sich in der anschließenden Bildverarbeitung oft nur schwer oder gar nicht ausgleichen. Einen Ausweg bildet die Aufnahme von Bildserien, bei denen die Aufnahmeparameter (Beleuchtungswinkel, Fokussierung, Objektpose) systematisch variiert werden. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Fusion solcher Bildserien; die dabei angewandte Methodik läßt sich als Minimierung problemangepaßter Energiefunktionen formalisieren. Wegen der Komplexität der zugehörigen Optimierungsrechnung wird eine effiziente Approximation angegeben, welche die praktische Einsetzbarkeit des Fusionsansatzes wesentlich verbessert und dennoch den visuellen Qualitätsanforderungen an das Ergebnisbild gerecht wird. Als Resultat erhält man hochwertige Bilder der zu prüfenden Objekte, die in Qualität und Datenumfang mit nur einer einzigen Aufnahme nicht möglich wären.

Angewandt werden die vorgestellten Verfahren auf die automatische, kriminaltechnische Erfassung von Projektilmündern und von Schlagbolzeneindrücken an verfeuert Patronenhülsen, mit dem Ziel, gerichtsverwertbare Bilddaten zu erhalten und automatische Vergleiche anzustellen [2]. Die interessierenden Oberflächenbereiche enthalten Spuren, die als eine Art „Fingerabdruck“ der Waffe aufgefaßt werden können. Um einen zuverlässigen Vergleich zweier Objekte zu erreichen, müssen qualitativ hochwertige Oberflächendaten unter reproduzierbaren Aufnahmebedingungen erfaßt werden.

2 Probleme bei der Bilderfassung

In der Kriminaltechnik sind die Anforderungen an Videobilder von zu untersuchenden Objekten besonders hoch. Es gilt sowohl sehr feine Details zu erkennen als auch möglichst alle relevanten Oberflächenbereiche vollständig und mit gutem Kontrast zu erfassen. Insofern sind die in diesem Bericht behandelten kriminaltechnischen Sichtprüfungsaufgaben – was die Bildakquisition betrifft – sehr anspruchsvoll. Für viele weniger schwierige Aufgaben lassen sich die vorgestellten Methoden in vereinfachter Form nutzbringend anwenden.

An die Bildakquisition werden insgesamt folgende Forderungen gestellt:

- Bilddaten qualitativ hochwertig (hohe Auflösung, hoher Kontrast, hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis),
- vollständige Erfassung relevanter Objektbereiche,
- reproduzierbare Aufnahmesituation,
- weitgehend automatisierte Bilderfassung.

Die Erfüllung all dieser Anforderungen mit der Erfassung nur eines Bildes ist aufgrund von Beschränkungen optischer Systeme i. allg. nicht möglich; siehe Bild 1.

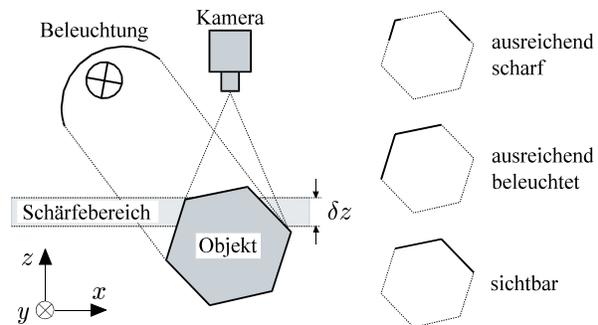


Bild 1: Probleme bei der Aufnahme.

Mit *einer* Aufnahme gelingt es nicht, die gesamte Objekt-oberfläche gleichzeitig ausreichend scharf, zufriedenstellend beleuchtet und vollständig zu erfassen. Allenfalls kann man erreichen, auf Teilbereichen der Oberfläche hinreichend gute Aufnahmebedingungen zu schaffen, die im Bild lokal zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen.

Es liegt nun nahe, nicht nur ein Bild, sondern eine ganze Serie von Bildern des Objektes aufzunehmen. Dabei werden die Aufnahmeparameter systematisch variiert, so daß jedes Objektdetail in mindestens einer der Aufnahmen in ausreichender Qualität abgebildet wird.

Verfügt man über Kriterien K , die es erlauben, die Qualität eines Bildes lokal zu spezifizieren, so ist es möglich,

aus allen Bildern der Serie jeweils die besten Bereiche herauszunehmen und in einer Form von „Patchworking“ zu einem hochwertigen Ergebnisbild zu verschmelzen.

2.1 Beleuchtung

Die Intensitätswerte auf dem Kameratarget, die in ihrer Gesamtheit ein Videobild ausmachen, entstehen in komplizierter Weise aus dem Zusammenspiel von Beleuchtung, Objekteigenschaften und Aufnahmeoptik. Bei den Objekteigenschaften sind es vor allem die örtliche Verteilung der Reflektanz und die Topographie der Oberfläche, die zu erkennbaren Strukturen im Kamerabild führen. Speziell bei Oberflächen, deren sichtbare Strukturen nicht nur auf eine ortsabhängige Reflektanz zurückgehen, sondern auch aus der räumlichen Oberflächenstruktur (Relief) resultieren, muß der Beleuchtung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um zufriedenstellende Bilder zu erhalten. Zu dieser Art von Objekten gehören reliefartige Spuren auf Projektilen und Patronenhülsen.

Mit gerichtetem Licht unter günstigem Einfallswinkel lassen sich reliefartige Strukturen kontrastreich in Grauwertbildern sichtbar machen. Allerdings entstehen dabei durch lokal unterschiedliche geometrische Konstellationen zwischen Oberflächenrelief, Beleuchtung und Aufnahmeoptik oftmals störende Inhomogenitäten im Bild [3].

Mit diffusem Licht könnte man im Gegensatz dazu zwar örtlich gleichmäßige Beleuchtungsbedingungen schaffen, jedoch mit schwachem Kontrast.

Durch systematische Variation der Beleuchtungskordinaten θ (Elevation) und φ (Azimut) des parallel einfallenden Lichtes kann man jeden Bereich des Reliefs in mindestens einem Bild einer sogenannten *Beleuchtungsserie* sehr gut sichtbar machen und die Bilder zu einem Resultat zu vereinigen, das mit physikalisch realisierbarer Beleuchtung in einem Einzelbild nicht zu erzielen wäre.

2.2 Schärfentiefe

Die Schärfentiefe läßt sich durch Verringerung der Apertur (Abblenden) erhöhen, jedoch setzt bei mikroskopischen Aufnahmen die Wellennatur des Lichtes Grenzen. Die Schärfentiefe δz und die laterale Auflösung δx sind abhängig. Für δz ergibt sich nach der Rayleighschen Gleichung für die Schärfentiefe: $\delta z \propto \text{NA}^{-2}$. Für die laterale Auflösungsgrenze folgt aus der Formel von Abbe: $\delta x \propto \text{NA}^{-1}$ (NA: numerische Apertur). Somit gilt: $\delta z \propto (\delta x)^2$; siehe [4]. Eine Verkleinerung der Apertur erhöht zwar die Schärfentiefe, gleichzeitig aber wird die laterale Auflösung vermindert.

Der Schärfentiefebereich läßt sich jedoch künstlich erweitern, indem man eine sogenannte *Fokusserie* des Objektes aufnimmt [4]. Dazu wird das Objekt in z -Richtung schrittweise verschoben, so daß sich jedes sichtbare Objekt-detail in mindestens einem Bild der Serie im Schärfenbereich der optischen Abbildung befindet.

2.3 Vollständige Oberflächenerfassung

Viele Objekte sind zu komplex geformt, als daß man eine gestellte Sichtprüfungsaufgabe anhand nur eines Kamerabildes erledigen könnte. Bei grober Vorabkenntnis der Objektgeometrie kann man die relative Lage von Objekt und

Aufnahmesensor derart variieren, daß man eine Serie von Bildern gewinnt, die alle interessierenden Oberflächenbereiche des Objektes abbilden [9]. Für das Zusammensetzen mehrerer Einzelbilder zu einem Gesamtbild kommen bewährte Verfahren der Photogrammetrie in Betracht [1].

3 Bildfusion

3.1 Erfassung von Bildserien

Die Bilder $d(\bar{x}, \bar{\omega})$ einer Serie werden durch den Parametervektor der Aufnahmesituation $\bar{\omega} = (\varphi, \theta, \zeta, \bar{\alpha})$ unterschieden, wobei φ und θ die Beleuchtungsrichtung, ζ die Gegenstandsweite und $\bar{\alpha}$ die Objektpose bezeichnen.

Zunächst muß festgelegt werden, wie der Parameterraum „abgetastet“ werden muß, damit sämtliche relevanten Signalanteile in der Bildserie enthalten sind, und eine Fusion zu einem hochwertigen Ergebnisbild möglich ist. Mit wenigen Bildern $d(\bar{x}, \bar{\omega}_i)$, $i = 0, \dots, n$ soll möglichst jeder interessierende Objektbereich zumindest in einem Bild in guter Qualität erfaßt werden.

Eine Antwort kann für die Erfassung von Fokusserien gegeben werden. Hierbei muß

$$\zeta_i = \zeta_0 + i\Delta z, \quad i = 0, \dots, n, \quad (1)$$

$$\Delta z \leq \delta z, \quad \zeta_0 \leq z(\bar{x}) \leq \zeta_n \quad (2)$$

gelten, damit sämtliche Bereiche der Oberfläche $z(\bar{x})$ zumindest einmal scharf abgebildet werden.

Bei Schußwaffenprojektilen ist es nicht notwendig, den φ, θ -Raum zweidimensional abzutasten, da hier das Nutzsignal $t(\bar{x})$ aus geraden, annähernd parallelen Riefen besteht. Solche Riefen weisen nur dann einen hohen Kontrast auf, wenn sie senkrecht zum Riefenverlauf beleuchtet werden. Daher reicht es in diesem Fall aus, θ zu variieren [8].

3.2 Fusion von Bildserien

Eine weitgehend systematische Abhandlung zum Thema Sensorfusion ist in [5] nachzulesen. Dort findet man einen allgemeinen Fusionsansatz, der auf der Minimierung einer sogenannten „Energiefunktion“

$$E = E_D(D, r) + \lambda E_K(r), \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

basiert. Dabei modelliert $E_D(D, r)$ den Zusammenhang zwischen den gegebenen Bilddaten (Bildserie) $D = \{d(\bar{x}, \bar{\omega}_i), i = 0, \dots, n\}$ und dem Fusionsresultat $r(\bar{x})$.

$E_K(r)$ modelliert wünschenswerte oder a priori bekannte Eigenschaften des Fusionsresultates $r(\bar{x})$. λ gewichtet beide Energiekomponenten.

Die „Energien“ $E_D(D, r)$ und $E_K(r)$ sind derart zu definieren, daß das Resultat desto wünschenswerter ausfällt, je geringer die Energie ist. Um $r(\bar{x})$ zu erhalten, muß E minimiert werden.

3.3 Fusion von Beleuchtungsserien

Die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Theorie soll nun konkret auf die Fusion von Beleuchtungsserien angewendet werden, wobei gelten soll: $\varphi = \varphi_i, i = 0, \dots, n, (\theta, \zeta, \bar{\alpha}) = \text{const.}$

Anhand von Bild 2 wird der Grundgedanke anschaulich erläutert. Für jeden Ort \bar{x} soll das „Beste“ aus der Serie herausgenommen und zu einem Endergebnis zusammengefügt

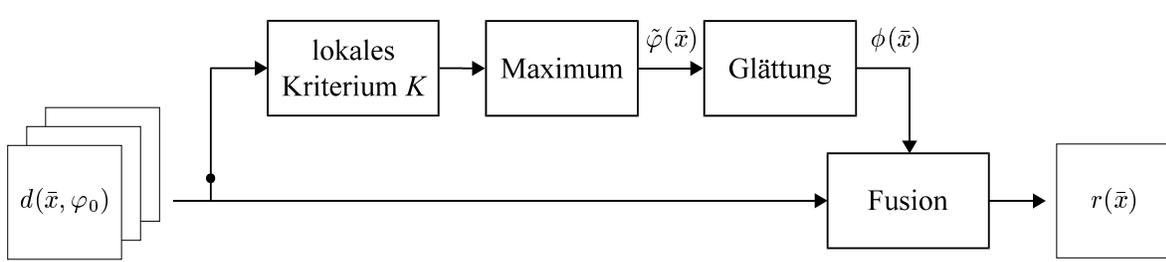


Bild 3: Struktur des Algorithmus zur Fusion von Beleuchtungsserien (merkmalsgestützte Datenfusion).

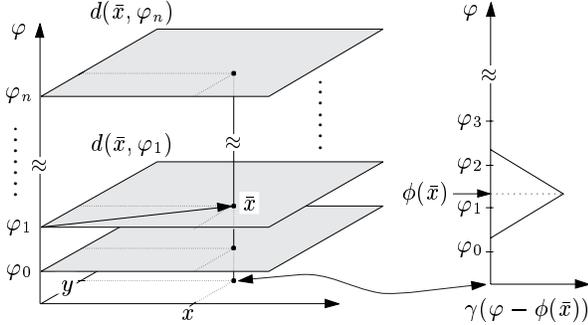


Bild 2: Selektion der besten Bildbereiche für die Fusion.

werden. Dabei spezifiziert das optimale Beleuchtungsazimut $\phi(\bar{x})$, aus welchen Bildern der Serie Bildbereiche „ausgeschnitten“ werden sollen. Diese optimale Parameterfunktion $\phi(\bar{x})$ darf sich örtlich nur „langsam“ ändern, um Interferenzen mit dem Nutzsignal und dadurch verursachte Artefakte zu vermeiden. I. allg. wird daher $\phi(\bar{x})$ Werte auch zwischen den diskreten φ_i annehmen. Deshalb ist Ausschneiden verallgemeinert in dem Sinne zu verstehen, daß durchaus mehrere Bilder aus der φ -Nachbarschaft von $\phi(\bar{x})$ in das Fusionsergebnis am Ort \bar{x} eingehen können. Dafür sorgt ein Interpolator $\gamma(\varphi - \phi(\bar{x})) \geq 0$, der i. allg. bzgl. φ unimodal und eng um ϕ konzentriert ist. In Bild 2 wird ein linearer Interpolator dargestellt, der durch gewichtete Mittelung für das Einblenden der jeweils zwei bestgeeigneten Bilder der Serie an der Stelle \bar{x} sorgt.

Für ein besseres Verständnis wird zunächst ein Algorithmus zur Fusion von Beleuchtungsserien vorgestellt. Anschließend wird die Fusionsaufgabe derart verallgemeinert werden, daß die Analogie zu der in Abschnitt 3.2 erläuterten Vorgehensweise deutlich wird. Es wird sich zeigen, daß das Verfahren eine effiziente Approximation der Lösung des Fusionsproblems durch Energieminimierung darstellt.

Bild 3 zeigt die Struktur des Algorithmus zur Fusion von φ -Beleuchtungsserien. Das Fusionsprinzip besteht in der Selektion der am besten beleuchteten Bildsegmente der Serie für jeden Ort \bar{x} basierend auf einem lokalen Kriterium K . Um einen möglichst hohen Kontrast im Fusionsergebnis $r(\bar{x})$ zu erzielen, eignet sich als Kriterium K z.B. die lokale Grauwertvarianz. Die ausgewählte Beleuchtungsrichtung, die für jeden Ort \bar{x} in die sogenannte *Beleuchtungskarte*

$$\tilde{\varphi}(\bar{x}) = \arg \max_{\varphi_i} K\{d(\bar{x}, \varphi_i)\} \quad (4)$$

eingetragen wird, muß eine örtlich langsamveränderliche

Funktion im Vergleich zum Nutzsignal $t(\bar{x})$ sein. Deshalb wird die Beleuchtungskarte mit einem Tiefpaß geglättet:

$$\phi(\bar{x}) = \angle \text{TP}\{e^{j\tilde{\varphi}(\bar{x})}\}. \quad (5)$$

Als Tiefpaß wird ein Binomialfilter verwendet, wobei die Zyklizität von φ beachtet werden muß, da $\varphi = \varphi + 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ gilt. Deshalb glättet man nicht $\tilde{\varphi}(\bar{x})$ direkt, sondern $\exp(j\tilde{\varphi}(\bar{x}))$ und erhält $\phi(\bar{x})$ als Winkel des komplexen Resultates [7]. Die resultierende Funktion $\phi(\bar{x})$ entspricht der bestgeeigneten lokalen Beleuchtungsrichtung.

Die eigentliche Fusion erfolgt durch gewichtete Überlagerung maximal zweier, bezüglich φ benachbarter Bilder $d(\bar{x}, \varphi_i)$. Lineare Interpolation sorgt für weiches Überblenden zwischen bzgl. φ benachbarten Bildern. Die schmale Ausdehnung von $\gamma(\cdot, \cdot)$ sorgt für eine Mittelung ausschließlich ähnlich beleuchteter Bilder. Hier könnten Licht und Schatten ihre Rollen tauschen, was dann zu einer für den Kontrast schädlichen Überlagerung führen würde.

Drei Eigenschaften des vorgeschlagenen Fusionsverfahrens sorgen für dessen gute Ergebnisse:

1. Für jeden Ort \bar{x} ähnelt das Fusionsergebnis $r(\bar{x})$ jenem Bild $d(\bar{x}, \varphi_i)$, das die beste Beleuchtung aufweist.
2. Die Glattheit des optimalen Azimuts $\phi(\bar{x})$ und die Überblendung φ -benachbarter Bilder gewährleisten, daß keine Artefakte in $r(\bar{x})$ vorhanden sind.
3. Das resultierende Bild $r(\bar{x})$ erreicht global gute Ergebnisse im Sinne des lokalen Kriteriums K .

Durch Formulierung von Energietermen, die die Nichterfüllung dieser Bedingungen bestrafen, kann eine Energiefunktion der Form von Gl. (3) gewonnen werden:

$$\begin{aligned} E &= \sum_i \sum_{\bar{x}} (r(\bar{x}) - d(\bar{x}, \varphi_i))^2 \gamma(\varphi_i - \phi(\bar{x})) \\ &\quad + \lambda_1 \sum_{\bar{x}} (\text{HP}\{\phi(\bar{x})\})^2 - \lambda_2 \sum_{\bar{x}} (-1) K\{r(\bar{x})\} \\ &= E_D(D, r, \phi) + \lambda_1 E_G(\phi) + \lambda_2 E_K(r), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\varphi_i = \varphi_0 + i\Delta\varphi, \quad i = 0, \dots, n,$$

$$\varphi_0 \leq \phi(\bar{x}) \leq \varphi_n, \quad \lambda_1, \lambda_2 > 0, \quad \text{HP}\{\cdot\}: \text{Hochpaß}.$$

Gl. (6) ist eine kompakte Beschreibung des Problems, die die bekannten und gewünschten Eigenschaften der an der Fusion beteiligten Größen sowie deren Zusammenhänge widerspiegelt.

Der erste Summand $E_D(D, r, \phi)$ in Gl. (6) sorgt für Datennähe von $r(\bar{x})$. Lokal soll $r(\bar{x})$ möglichst demjenigen Bild $d(\bar{x}, \varphi_i)$ der Serie gleichen, das am Ort \bar{x} optimale Beleuchtungseigenschaften zeigt. $\gamma(\varphi_i - \phi(\bar{x}))$ läßt nur das

bestgeeignete $d(\bar{x}, \varphi_i)$ und dessen Nachbarn eingehen. Der zweite Summand $E_G(\phi)$ bestraft unzulässig hochfrequente Signalanteile von $\phi(\bar{x})$, indem er die Energie des hochpaßgefilterten Signals $HP\{\phi(\bar{x})\}$ wiedergibt. Dieser Summand stellt damit eine örtliche Glattheitsforderung für den optimalen Beleuchtungswinkel $\phi(\bar{x})$ dar. Der dritte Summand $E_K(r)$ bewertet, ob das lokale, mit der Bildqualität monoton wachsende Gütekriterium K global im Fusionsresultat $r(\bar{x})$ hohe Werte erzielt.

Bei erneuter Betrachtung des in Bild 3 gezeigten Verfahrens fällt eine Analogie zwischen dessen Blöcken und den Einzelsummanden von Gl. (6) auf. In den beiden linken oberen Blöcken wird im wesentlichen $E_K(r)$ minimiert. Die im rechten oberen Block durchgeführte Glättung sorgt vor allem für eine Minimierung von $E_G(\phi)$. Anschließend wird im Fusionsblock eine Überblendung zwischen den besten Bildern aus dem Bildstapel durchgeführt, was im wesentlichen $E_D(D, r, \phi)$ minimiert.

Die simultane Minimierung von E bezüglich $r(\bar{x})$ und $\phi(\bar{x})$ liefert das unter den getroffenen Annahmen optimale Fusionsergebnis, ist jedoch sehr rechenaufwendig. Die vorgeschlagene Strategie nach Bild 3 stellt eine *effiziente Approximation* der Optimierung dar, die auf einer getrennten Minimierung der Summanden der Energiefunktion (6) ohne Rücksicht auf die Faktoren λ_i basiert.

3.4 Fusion von Fokuserien

Bei Fokuserien kann man analog zu Beleuchtungsserien bzgl. φ verfahren, wenn man in Gl. (6) $\phi(\bar{x})$ durch die optimale Gegenstandsweite $\xi(\bar{x})$ und die Winkel φ_i durch tatsächlich angefahrte Gegenstandsweiten ζ_i ersetzt:

$$E = E_D(D, r, \xi) + \lambda_1 E_G(\xi) + \lambda_2 E_K(r). \quad (7)$$

Die Bedeutung der Energierterme bleibt gleich bei Serien mit variabler Beleuchtung. Auch hier muß eine gewisse Glattheit für $\xi(\bar{x})$ gefordert werden, da zur empirischen Beurteilung der Schärfe anhand eines Schärfekriteriums K eine örtliche Mittelung vorgenommen werden muß, die in ihrem Einzugsgebiet eine näherungsweise konstante Gegenstandsweite $\xi(\bar{x})$ implizit voraussetzt. Für K eignen sich die gleichen Kriterien wie bei Beleuchtungsserien.

Die Abbildungsmaßstäbe der zu einem scharfen Bild $r(\bar{x})$ fusionierten Ausschnitte der Serie $\{d(\bar{x}, \zeta_i)\}$ sind bei geringer Schärfentiefe δz der Einzelbilder auch ohne telezentrische Optik näherungsweise gleich, da der Schärfereich bei einer festen Gegenstandsweite liegt.

4 Experimentelle Ergebnisse

4.1 Beschreibung des Erfassungssystems

Zur Erfassung von Bildserien wurde eine rechnergesteuerte Anlage aufgebaut, die aus einer flexiblen Beleuchtungseinrichtung, einer kommerziellen Optik und einer 3D-Verschiebeeinrichtung besteht.

Das Beleuchtungssystem basiert auf einer Vorrichtung, die zur Erkennung von Oberflächenmerkmalen und -defekten entwickelt wurde [6]. Das System besteht aus einer Grundplatte, in der 256 individuell ansteuerbare LEDs angebracht sind. Über einen Parabolspiegel wird das Licht

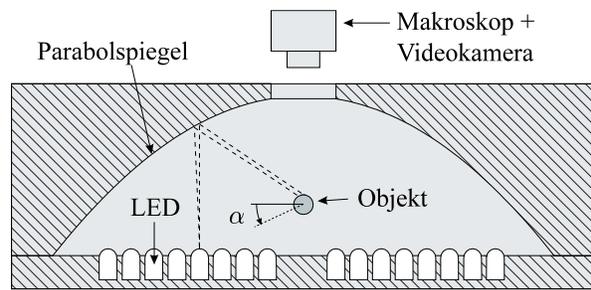


Bild 4: Aufbau des Beleuchtungssystems.

der LEDs in dessen Brennpunkt auf das zu erfassende Objekt geleitet; siehe Bild 4. Über eine Öffnung wird das Objekt mit Hilfe eines Makroskops und einer CCD-Kamera erfaßt.

Die Lage einer LED bestimmt Azimut φ und Elevation θ des Lichtstrahles, mit dem das Objekt beleuchtet wird. Durch Variation dieser Parameter kann jeder Punkt auf der Oberfläche mit maximalem Kontrast erfaßt werden.

Die 3D-Verschiebeeinrichtung erlaubt eine translatorische bzw. rotatorische Positionierung mit einer Genauigkeit von $0,5 \mu\text{m}$ bzw. $0,36^\circ$.

4.2 Ergebnisse

In Bild 5 sind links 4 von insgesamt 20 Aufnahmen einer Beleuchtungsserie eines Schlagbolzeneindrucks einer Patronenhülse zu sehen. Es gilt: $\varphi_i = i \cdot 18^\circ, i = 0, \dots, 19, \theta = \text{const.}$ Zur visuellen Beurteilung des Fusionsergebnisses (mittleres Bild) wurde das gleiche Objekt mit diffuser Beleuchtung erfaßt (Bild 5 rechts). Im diffus beleuchteten Bild sind viele relevante Merkmale im Bereich des Schlagbolzeneindrucks nicht mehr sichtbar.

Bild 6 zeigt links 6 von 20 Bildern einer Fokuserie eines Projektils, die durch schrittweise Änderung der Gegenstandsweite ($\Delta z = 78,5 \mu\text{m}$) bei diffuser Beleuchtung gewonnen wurden. Im Fusionsergebnis Bild 6 rechts erkennt man, daß – im Gegensatz zu den Bildern aus der Serie – sämtliche Oberflächenbereiche scharf enthalten sind: eine virtuelle Erhöhung der Schärfentiefe wurde erreicht.

In Bild 7 ist ein Ausschnitt des Fusionsergebnisses einer Bildserie des Projektilmantels gezeigt. Bei der Serie wurden die Elevation θ ($\Delta\theta = 9,5^\circ$), die Gegenstandsweite ζ ($\Delta z = 131,5 \mu\text{m}$) und der Rotationswinkel des Objektes α ($\Delta\alpha = 1,8^\circ$) systematisch variiert. Für jede Gegenstandsweite wurde eine Beleuchtungsserie fusioniert. Anschließend wurden die Fokuserien verschmolzen und dann die Ergebnisse für die unterschiedlichen Objektposen α_i zum Endergebnis – dem Mantelabbild – fusioniert.

5 Zusammenfassung

Es wurde eine Methodik zur Fusion von Bildserien, die durch systematische Änderung der Aufnahmesituation gewonnen wurden, präsentiert. Das Fusionsproblem wird in Form einer Energiefunktion formuliert, deren Minimierung das unter den getroffenen Annahmen optimale Fusionsresultat liefert. In unserem Falle erlaubt die Struktur der Energiefunktion, daß die ansonsten sehr aufwendige Optimierungsrechnung durch getrennte Minimierung der Sum-

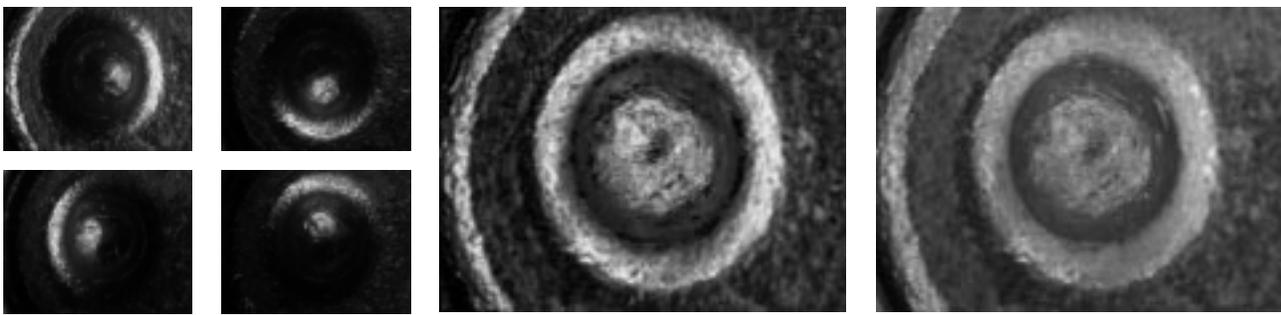


Bild 5: Schlagbolzeneindruck: l.) Beleuchtungsserie (Bilder $i = 0, 5, 10, 15$); m.) Fusionsergebnis $r(\bar{x})$ (Kriterium K : Varianz in 5×5 -Umgebung; Glättung von $\tilde{\varphi}(\bar{x})$ mit 49×49 -Binomialfilter); r.) homogene Beleuchtung.

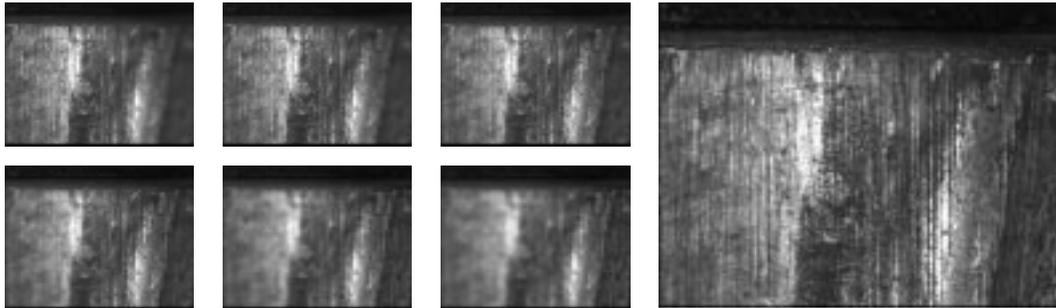


Bild 6: Projektil: l.) Fokusserserie (Bilder $i = 2, 5, 8, 11, 14, 17$); r.) Fusionsergebnis $r(\bar{x})$ (Kriterium K : Varianz in 5×5 -Umgebung; Glättung von $\tilde{\zeta}(\bar{x})$ mit 21×21 -Binomialfilter).



Bild 7: 30% der Abwicklung des Mantels eines Projektils. Das Gesamtbild umfaßt 5018×512 Pixel!

manden der Energiefunktion effizient approximiert werden kann. Als Ergebnis erhält man qualitativ hochwertige Bilder, die in einer einzigen Aufnahme nicht realisierbar sind. Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren wurde anhand von Bildern von Projektilmänteln, Schlagbolzeneindrücken an verfeuerten Patronenhülsen und Projektilen demonstriert. Der erhöhte Aufwand bei der Bildakquisition ist in der Kriminaltechnik durchaus gerechtfertigt ist, weil die für die spätere Bildauswertung wesentlichen Merkmale dann robuster und somit reproduzierbarer erfaßt werden können.

Literatur

- [1] Bähr, H. P. und Vögtle, T.: Digitale Bildverarbeitung. Wichmann Verlag, Karlsruhe (1991).
- [2] Beyerer, J. und Puente León, F.: Bildverarbeitungsverfahren für die Kriminaltechnik zur Identifikation von Schußwaffen. BKA-Symposium der AG Schußwaffen/Ballistik, Ludwigshafen, 18.–20. Sept. (1995).
- [3] Beyerer, J. und Puente León, F.: Suppression of inhomogeneities in images of textured surfaces. *Optical Engineering* **36** (1) (1997).
- [4] Häusler, G. und Körner, E.: Abbildung mit erweiterter Schärfentiefe. *Zeiss Informationen*, Oberkochen 29, 9–13 (1986).
- [5] Clark, J. J. und Yuille, A. L.: *Data Fusion for Sensory Information Processing Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston (1990).
- [6] Malz, R.: Verfahren zum beleuchtungsdynamischen Erkennen und Klassifizieren von Oberflächenmerkmalen und -defekten eines Objektes und Vorrichtung hierzu. Offenlegungsschrift DE 41 23 916 A1, Deutsches Patentamt (1992).
- [7] Mardia, K. V.: *Statistics of Directional Data*. Academic Press, London (1972).
- [8] Puente León, F.: An automated system for the macroscopic acquisition of images of firearm bullets. *Proc. XIV IMEKO World Congress*, Tampere (1997).
- [9] Tarbox, G. H. und Gottschlich, S. N.: Planning for Complete Sensor Coverage in Inspection. *CVIU* **61** (1), 84–111 (1995).