

Datenfusion zur Gewinnung hochwertiger Bilder in der automatischen Sichtprüfung

Fernando Puente León und Jürgen Beyerer, Karlsruhe



Dipl.-Ing. Fernando Puente León ist wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Meß- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. F. Mesch). Hauptarbeitsgebiete: Bildverarbeitung, automatische Sichtprüfung und Mustererkennung.

Adresse: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Meß- und Regelungstechnik, Richard-Willstätter-Allee, D-76131 Karlsruhe, Tel.: (0721) 608-3604, Fax: (0721) 661874. E-mail: f.puente@ieee.org



Dr.-Ing. Jürgen Beyerer ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Meß- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe (Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. F. Mesch). Hauptarbeitsgebiete: Bildverarbeitung und automatische Sichtprüfung, statistische Signalverarbeitung, Informationstheorie und Meßtechnik.

Adresse: siehe oben. Tel.: (0721) 608-2209, E-mail: beyerer@mrt.mach.uni-karlsruhe.de

Es werden Bildfusionsverfahren vorgestellt, die eine Erzeugung qualitativ hochwertiger Bilder für die automatische Sichtprüfung erlauben. Zuerst wird auf drei Probleme eingegangen – Beleuchtung, Schärfentiefe und Sichtbarkeit – aufgrund derer optische Systeme bei der Erfassung von hinreichend guten Bildern oftmals versagen. In sämtlichen Fällen werden die damit einhergehenden Beschränkungen dadurch kompensiert, daß Bildserien erfaßt werden und diese mit Hilfe von geeigneten Datenfusionsverfahren zu einem verbesserten Ergebnis kombiniert werden. Die vorgestellten Algorithmen wurden speziell zur Erfassung von Schußwaffenprojektilen und Patronenhülsen entwickelt, können aber ebenfalls zur Erfassung beliebiger Objekte, wie z.B. Werkzeuge, im Rahmen der automatischen Sichtprüfung angewendet werden.

Data fusion for the acquisition of high-quality images in automated visual inspection

Image fusion methods are presented that allow a generation of high-quality images in automated visual inspection. The paper focusses on three problems – illumination, depth of focus, and visibility – that often cause optical systems to fail acquiring images of sufficient quality. In all cases, the accompanying limitations are compensated by obtaining series of images and combining them into an improved result by means of appropriate data fusion techniques. The presented algorithms were originally developed for acquisition of images of

firearm bullets and cartridge cases, but they are also well-suited for the acquisition of high-quality images of any object, e.g. machine tools, for automated visual inspection purposes.

1 Einleitung

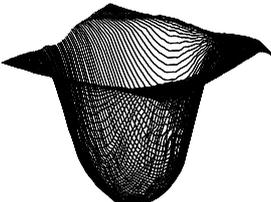
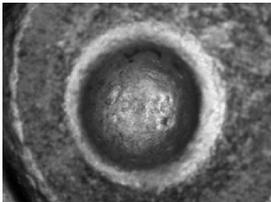
Bei der automatischen Sichtprüfung von metallischen Oberflächen räumlicher Objekte bereitet die Bilderfassung verschiedene Schwierigkeiten:

- 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,
- bei räumlichen Objekten sind nicht alle interessierenden Bereiche gleichzeitig sichtbar.

Fehler 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 und als Spezialfall des Bayesischen Fusionsansatzes interpretieren. 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 vor allem auf die automatische, kriminaltechnische Erfassung von Projektilmündern und von Schlagbolzeneindrücken an verfeuerten Patronenhülsen, mit dem Ziel, gerichtsverwertbare Bilddaten zu erhalten und automatische Vergleiche anzustellen [4]. 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.

Tabelle 1: Vergleich von Profildaten und Grauwertbildern zur Identifikation von Schußwaffen.

	Profildaten	Grauwertbild
		
Tiefeninformation	ja	nicht eindeutig
Optische Eigenschaften	nein	ja (z.B. Reflektanz)
Zeitaufwand	hoch	gering
Störungsanfälligkeit	mechanisch: mittel optisch: hoch	gering
Reproduzierbarkeit	hoch	beleuchtungsabhängig
Berührungslose Erfassung	mechanisch: nein optisch: ja	ja
Visuelle Auswertung	schwierig	möglich
Kosten	hoch	mittel

Als Grundlage für den Vergleich können sowohl Profildaten als auch Grauwertbilder dienen. Beide Möglichkeiten werden in der Tabelle 1 verglichen. Profildaten geben zwar echte $2\frac{1}{2}$ -D-Informationen der Oberfläche wieder, jedoch ist ihre Gewinnung mit derzeit verfügbaren Sensoren zu zeit- und kostenaufwendig, und außerdem gehen sichtprüfungsrelevante Reflektanzstrukturen verloren. Obwohl Grauwerte nicht eindeutig aus Höhenwerten hervorgehen, können durch geeignete Beleuchtung – selbst bei reliefartigen Strukturen konstanter Reflektanz – die kriminaltechnisch relevanten Spuren selektiv und mit hohem Kontrast mittels Grauwertbildern erfaßt werden. Zusätzlich spielen in der Kriminaltechnik weitere Faktoren eine wichtige Rolle, wie z.B. die Möglichkeit der leichteren visuellen Interpretation und die damit verbundene höhere gerichtliche Akzeptanz, was ebenfalls dafür spricht, den Vergleich anhand von Grauwertbildern durchzuführen.

Bemerkt sei hier noch, daß die derzeit praktizierte gerichtsverwertbare Erfassung eines Projektils oder eines Schlagbolzeneindrucks mit konventionellen fotografischen Methoden sehr aufwendig ist und mitunter mehr als einen Tag Arbeitszeit in Anspruch nimmt. Die so erhaltenen Bilder sind jedoch in keiner Weise standardisiert und somit für eine Verwendung in Datenbanken für einen automatischen Spurenvergleich auf Bilddatenebene ungeeignet.

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 Aufsatz behandelten kriminaltechnischen Sichtprüfungsaufgaben – was die Bildakquisition betrifft – besonders anspruchsvoll. Für viele weniger schwierige Aufgaben lassen sich die vorgestellten Me-

thoden in vereinfachter Form nutzbringend anwenden.

An die Bildakquisition werden insgesamt folgende Forderungen gestellt:

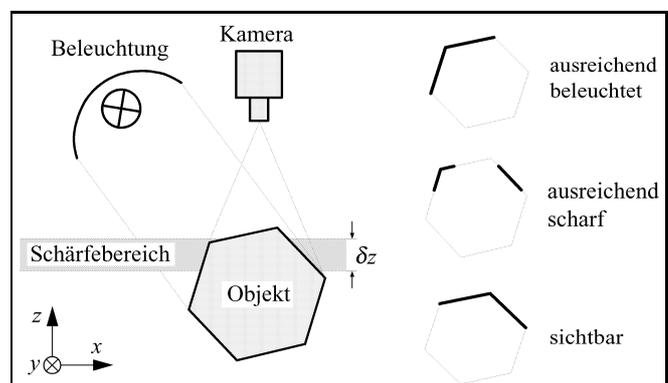
- Bilddaten qualitativ hochwertig (hohe Auflösung, hoher Kontrast, hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis),
- vollständige Erfassung aller relevanten Bereiche eines Objektes,
- reproduzierbare Aufnahmesituation,
- weitgehend automatisierte Bilderfassung.

Es zeigt sich, daß die Erfüllung all dieser Anforderungen mit der Erfassung nur eines Bildes aufgrund von Beschränkungen optischer Systeme i. allg. nicht möglich ist. Das Bild 1 soll die auftretenden Probleme illustrieren.

Mit einer Kameraaufnahme gelingt es nicht, die gesamte Objektoberfläche gleichzeitig ausreichend scharf, zufriedenstellend beleuchtet und vollständig zu erfassen. Allenfalls kann man erreichen, daß man auf Teilbereichen der Oberfläche hinreichend gute Aufnahmebedingungen schaffen kann, die im Videobild lokal zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen.

Es liegt nun nahe, nicht nur ein Bild, sondern eine ganze Serie von Bildern des Objektes aufzunehmen. Dabei wird die Aufnahmesituation, d.h. die Beleuchtung und die Lage des Objektes relativ zur Kamera, systema-

Bild 1: Probleme bei der Aufnahme.



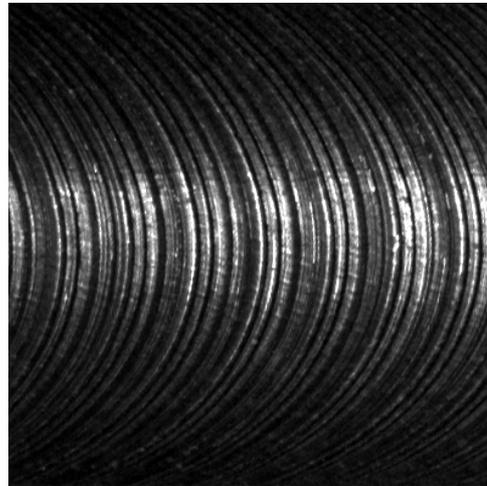
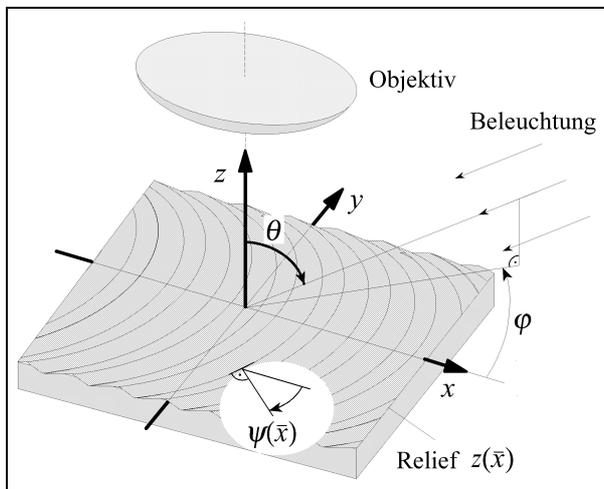


Bild 2: Fräsextur:
a) Aufnahmegeometrie, b) Grauwertbild.

tisch 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 (z.B. Schärfe- oder Kontrastmaße), so ist es möglich, aus allen Bildern der Serie jeweils die besten Bereiche herauszunehmen und zu einem hochwertigen Ergebnisbild zu verschmelzen. Die hierbei angewandten Methoden zur Fusion unterschiedlicher Bilddaten werden in Abschnitt 3 genauer erörtert.

Im folgenden sollen zunächst die in Bild 1 skizzierten Probleme im einzelnen diskutiert werden.

2.1 Beleuchtung

Beleuchtung ist ein kritischer Aspekt hinsichtlich Bildqualität und Reproduzierbarkeit der Aufnahmebedingungen; dennoch wird in sehr wenigen Arbeiten auf ihre Optimierung eingegangen, und sie wird selten als aktive Komponente des Erfassungssystems betrachtet [6, 2, 14, 19].

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 u.a. metallische Gegenstände mit räumlichen Oberflächentexturen, wie sie z.B. in der industriellen Fertigung durch verschiedene oberflächen-erzeugende Bearbeitungsverfahren entstehen.

Die Problematik soll am Beispiel einer stirnplangefrästen Oberfläche verdeutlicht werden, die in Bild 2a dargestellt ist.

Die Oberfläche wird mit parallelem Licht unter den Winkeln θ und φ bestrahlt. Wegen der stark spiegel-

den Reflexionseigenschaften metallischer Oberflächen erscheinen Texturbereiche, in denen die Fräsriefen näherungsweise senkrecht (d.h. $\varphi = \psi(\bar{x})$ mit $\bar{x} = (x, y)^T$) zu ihrem lateralen Verlauf beleuchtet werden, besonders hell und kontrastreich. Im Falle des Fräseliefs in Bild 2a sind diese Texturbereiche streifenförmig und parallel zur x -Achse; siehe Bild 2b.

Mit diffusem Licht könnte man im Gegensatz dazu zwar gleichmäßige Beleuchtungsbedingungen für die ganze sichtbare Textur schaffen, jedoch wäre der resultierende Kontrast sehr schwach. Im Vergleich dazu wird in Bild 2b, u.a. durch Schattenwurf, die Oberflächen-textur partiell mit sehr hohem Kontrast und mithin mit einem guten Signal-zu-Rausch Verhältnis sichtbar gemacht.

Es liegt nahe, durch systematische Variation der Beleuchtungskoodinaten θ und φ des parallel einfallenden Lichtes jeden Bereich des Reliefs in mindestens einem Bild einer sogenannten *Beleuchtungsserie* sehr gut sichtbar zu machen und die Bilder zu einem Resultat zu vereinigen, das mit physikalisch realisierbarer Beleuchtung in einem Einzelbild nicht zu erzielen wäre.

2.2 Schärfentiefe

Prinzipiell läßt sich die Schärfentiefe durch Verringerung der Apertur (Abblenden) erhöhen. Speziell jedoch bei mikroskopischen Aufnahmen setzt hier die Wellennatur des Lichtes Grenzen. Die Schärfentiefe δz und die laterale Auflösung δx sind nicht unabhängig. Für δz ergibt sich nach der Rayleighschen Gleichung für die Schärfentiefe: $\delta z \propto NA^{-2}$. Für die laterale Auflösungsgrenze folgt aus der Formel von Abbe: $\delta x \propto NA^{-1}$, wobei NA die numerische Apertur des Objektivs ist. Somit gilt insgesamt: $\delta z \propto (\delta x)^2$; siehe [7]. D.h. insbesondere, daß eine Verkleinerung der Apertur zwar die Schärfentiefe erhöht, gleichzeitig aber die laterale Auflösung vermindert wird.

Extremes Abblenden würde zudem den empfangenen Lichtstrom stark reduzieren, so daß eine hochempfindliche Kamera oder lange Belichtungszeiten notwendig würden. Darüberhinaus lassen sich viele kommerzielle Optiken – wie z.B. das von uns verwendete Makroskop der Firma Leica – ohne Umbau des Gerätes nur begrenzt

abbilden.

Der Schärfentiefebereich läßt sich jedoch künstlich erweitern, indem man eine sogenannte *Fokusserie* des Objektes aufnimmt [7, 9, 11]. Dazu wird das Objekt in z-Richtung schrittweise verschoben, so daß sich jedes sichtbare Objektdetail in mindestens einem Bild der Serie im Schärfebereich der optischen Abbildung befindet.

Bemerkt sei noch, daß Beleuchtungs- und Schärfeproblematik nicht gänzlich unabhängig voneinander betrachtet werden können, da beispielsweise zur bilddatengestützten Feststellung lokaler Schärfe eine geeignete Beleuchtung notwendig ist.

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 [17]. Für das Zusammensetzen mehrerer Einzelbilder zu einem Gesamtbild – falls das bei dem zu untersuchenden Objekt überhaupt sinnvoll ist – kommen bewährte Verfahren aus der Photogrammetrie als Werkzeuge in Betracht [1].

3 Bildfusion

Auf dem Gebiet der sogenannten *Sensorfusion* wird unterschieden, ob die Fusion direkt auf der Signalebene (Datenfusion), auf der Merkmalebene (Merkmalsfusion) oder auf einer symbolischen Ebene (Entscheidungsfusion) erfolgt. Die in diesem Aufsatz vorgestellten Verfahren nehmen eine Verschmelzung auf der Ebene der Bildsignale vor, stützen sich dabei aber auf Merkmale – sie können daher als Verfahren zur *merkmalsgestützten Datenfusion* bezeichnet werden.

Die Verschmelzung der Sensordaten kann *konkurrierend* oder *komplementär* erfolgen, je nachdem, ob für einen Ort \bar{x} die Nutzinformation über mehrere Bilder verteilt vorliegt, oder ob sie in einem oder wenigen Bildern konzentriert enthalten ist. Ein Beispiel für eine konkurrierende Fusion wäre die Akkumulation einer Serie von Bildern unter gleichen Aufnahmebedingungen zur Rauschunterdrückung. In dieser Arbeit wird eine *komplementäre Datenfusion* angestrebt, die dann sinnvoll ist, wenn die gesamte Nutzinformation verteilt auf die Bilder der Serie lokal konzentriert vorliegt. Es soll möglichst verhindert werden, daß zwischen den unterschiedlichen Bildsignalen eine schädliche Mittelung stattfindet, da sie i. allg. zu einer Kontrastverringerng führt. Vielmehr soll ein intelligentes *Patchworking* mit weichen Übergängen zwischen Bildteilen unterschiedlicher Herkunft erreicht werden. Die hierbei zu fusionierenden Sensoren sind in dem Sinne virtuell, als daß mit nur einem realen Sensor – einer CCD-Kamera – eine Serie von Bildern bei unterschiedlichen Aufnahmesituationen gewonnen wird. Wegen der Gleichartigkeit der „Einzelsensoren“ handelt es sich um eine *homogene Sensorfusion*.

3.1 Erfassung von Bildserien

Die Bilder $d(\bar{x}, \bar{\omega})$ einer Serie werden durch den Parametervektor der Aufnahmesituation

$$\bar{\omega} = (\varphi, \theta, \zeta, \bar{\alpha}^T, \dots)^T \quad (1)$$

unterschieden, wobei φ und θ Azimut und Elevationswinkel der Beleuchtungsrichtung und ζ die Gegenstandsweite bezeichnen. Der Parameter $\bar{\alpha}$ dient zur Beschreibung der Objektpose relativ zur Aufnahmeoptik. Zusätzlich könnten weitere Parameter berücksichtigt werden, z.B. die Integrationszeit der Videokamera oder die Wellenlänge des verwendeten Lichtes.

Bevor aber eine Bildserie gewonnen wird, muß festgelegt werden, wie der Parameterraum abgetastet werden muß, damit sämtliche relevanten Signalanteile in der Bildserie enthalten sind, so daß eine Fusion zu einem gleichmäßig hochwertigen Ergebnisbild möglich ist. Das Ziel dabei ist es, mit möglichst wenigen Bildern

$$d(\bar{x}, \bar{\omega}_i), \quad i = 0, \dots, n \quad (2)$$

möglichst jeden interessierenden Objektbereich zumindest in einem Bild in guter Qualität zu erfassen. Diese Problematik hängt sehr stark sowohl von der Objektgeometrie als auch von der Oberflächentextur ab und kann hier nicht abschließend und allgemeingültig behandelt werden. Teilaspekte dieser Problemstellung werden in [14, 17, 19] aufgegriffen.

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

$$\zeta_i = \zeta_0 + i\Delta z, \quad i = 0, \dots, n, \quad (3)$$

$$\Delta z \leq \delta z, \quad \zeta_0 \leq z(\bar{x}) \leq \zeta_n \quad (4)$$

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

3.2 Fusion von Bildserien

Inzwischen ist die Literatur über Bilddatenfusion sehr umfangreich. Allerdings sind die meisten darin angegebenen Verfahren wenig systematisch, sondern eher *ad hoc* Lösungen einer bestimmten Aufgabenstellung. In [6] etwa wird ein Verfahren präsentiert, um Bilder, die durch Variation der Aufnahmesituation gewonnen wurden, mit Hilfe einer Pyramidentransformation zu fusionieren. Jedoch wird vorhandenes Wissen über die Entstehung der Einzelbilder sowie deren Relationen nicht ausgenutzt, was zu vermeidbaren Mittelungen zwischen den Bildern und damit verbunden zu teilweise destruktiven Überlagerungen von Nutzinformation führt.

Eine weitgehend systematische Abhandlung zum Thema Sensorfusion ist in [8] nachzulesen. Dort findet man einen allgemeinen Fusionsansatz, der auf der Minimierung einer sogenannten „Energiefunktion“

$$E = E_D(D, r) + \lambda E_K(r), \quad \lambda > 0 \quad (5)$$

basiert und der auch in dieser Arbeit verfolgt wird. Dabei modelliert $E_D(D, r)$ den Zusammenhang zwischen den gegebenen Bilddaten (Bildserie)

$$D = \{d(\bar{x}, \bar{\omega}_i), i = 0, \dots, n\} \quad (6)$$

und dem Fusionsresultat $r(\bar{x})$.

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

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.

Bei diesem Fusionsansatz läßt sich ein Zusammenhang mit der *Regularisierungstheorie* erkennen: Ist der Rückschluß von D auf r ein schlecht gestelltes Problem [18], so fungiert $\lambda E_K(r)$ als Regularisator (Penalty-Term), um ein vernünftig gestelltes Problem zu erhalten und den Rückschluß von D auf r näherungsweise zu ermöglichen.

Durch Einführung von Gibbschen Dichten [8] kann zusätzlich ein Zusammenhang mit der *Bayesischen Fusionstheorie* und der Theorie der *Markov Random Fields* hergestellt werden:

$$p(r|D) \propto e^{-\frac{E}{T}} = e^{-\frac{E_D(D,r)}{T}} e^{-\frac{\lambda E_K(r)}{T}}. \quad (7)$$

Diese Gleichung entspricht der von der Physik her bekannten Boltzmann-Verteilung bei der Temperatur T . Dadurch gehen Energiesummen in Produkte von Wahrscheinlichkeitsdichten über. Wählt man quadratische Energiefunktionen, so ergeben sich darüberhinaus Gaußsche Dichten. Der erste Term in Gl. (7) entspricht der Likelihood-Funktion, die zwischen den Beobachtungsgrößen D und der gesuchten Größe r vermittelt. Der zweite Term ist die a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) für das Fusionsresultat r . Das Produkt aus beiden ist proportional zur a posteriori WDF $p(r|D)$. Insbesondere führt die Minimierung von Gl. (5) wegen der Monotonie der Exponentialfunktion auf die MAP-Lösung (Maximum a posteriori) von Gl. (7).

Die Fusion mittels Energieminimierung ist somit ein Spezialfall der viel allgemeineren Bayesischen Fusionstheorie, die ihre Aussagen auf die a posteriori Wahrscheinlichkeit

$$p(r|D) = \frac{p(D|r) \cdot p(r)}{p(D)} \quad (8)$$

stützt [8].

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Definition der Energiefunktion sowohl objektives Wissen als auch subjektive Einschätzungen und Wunschvorstellungen widerspiegelt. Der Übergang von Gl. (5) zu Gl. (7) mittels Gibbschen Dichten ist willkürlich. Insofern ist Gl. (7) nur formal eine WDF, ohne direkten Anspruch auf physikalische Realität.

Die Verallgemeinerung des Fusionsproblems durch Gl. (5) und Gl. (7) hat aber den wesentlichen Vorteil, daß sie Methoden zur Lösung inverser Probleme erschließt, die aus der statistischen Physik stammen, z.B. *simulated annealing* oder *mean field* Methoden [8, 10].

3.3 Fusion von Beleuchtungsserien

Die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Theorie soll nun konkret auf die Fusion von Beleuchtungsserien ange-

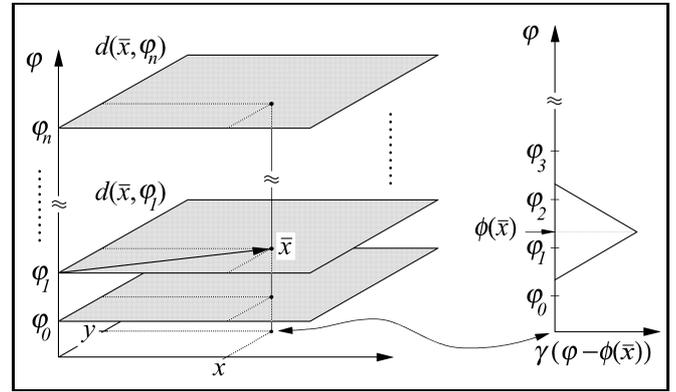


Bild 3: Selektion der günstigsten Bildausschnitte für die Fusion.

wendet werden, wobei zunächst der Einfachheit halber nur das Azimut φ variiert wird und der Elevationswinkel θ , die Gegenstandsweite ζ und die Objektpose $\bar{\alpha}$ konstant gehalten werden.

Vor der mathematischen Beschreibung des Fusionsproblems, sei anhand von Bild 3 der Grundgedanke anschaulich erläutert. Für jeden Ort \bar{x} soll das „Beste“ aus der Serie herausgenommen und zu einem Endergebnis zusammengefügt 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. Im allgemeinen 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 für den Ort \bar{x} eingehen können. Dafür sorgt ein Interpolator $\gamma(\varphi - \phi(\bar{x})) \geq 0$, der im allgemeinen bzgl. φ unimodal und eng um ϕ konzentriert ist. Speziell im Bild 3 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:

$$\gamma(\beta) = \frac{1}{\Delta\varphi} \begin{cases} \Delta\varphi - |\beta| & \text{für } |\beta| \leq \Delta\varphi \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Für das vorliegende Fusionsproblem lautet ein konkretes Energiefunktional im Sinne von Gl. (5):

$$\begin{aligned} E &= \sum_i \sum_{\bar{x}} (r(\bar{x}) - d(\bar{x}, \varphi_i))^2 \gamma(\varphi_i - \phi(\bar{x})) \\ &+ \lambda_1 \sum_{\bar{x}} (\text{HP}\{\phi(\bar{x})\})^2 \\ &+ \lambda_2 \sum_{\bar{x}} (-1) \cdot K\{r(\bar{x})\} \\ &= E_D(D, r, \phi) + \lambda_1 E_G(\phi) + \lambda_2 E_K(r) \end{aligned} \quad (9)$$

mit

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_0 + i\Delta\varphi, \quad i = 0, \dots, n, \\ \varphi_0 \leq \phi(\bar{x}) \leq \varphi_n, \quad \lambda_1, \lambda_2 > 0, \quad \text{HP}\{\cdot\}: \text{Hochpaß.} \end{aligned}$$

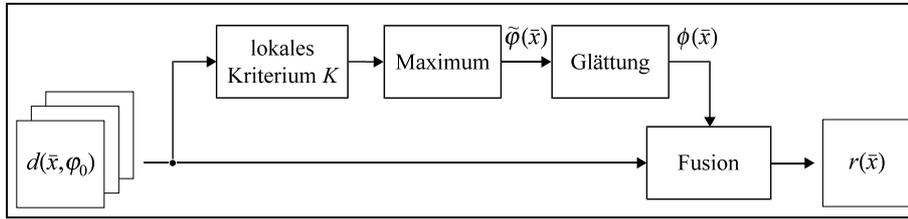


Bild 4: Struktur der Minimierungsstrategie für E.

Bei Gl. (9) handelt es sich um eine kompakte Beschreibung des Fusionsproblems, welche die bekannten und gewünschten Eigenschaften der an der Fusion beteiligten Größen sowie deren Zusammenhänge widerspiegelt. Zur Lösung der Fusionsaufgabe muß E simultan bzgl. $r(\bar{x})$ und der benötigten Hilfsgröße $\phi(\bar{x})$ minimiert werden. Insofern gibt diese Gleichung keinen Hinweis auf explizite Schätzvorschriften für $r(\bar{x})$ und $\phi(\bar{x})$. Solche werden aber in Abschnitt 3.3.1 angegeben.

Formal taucht hier im Vergleich zu Gl. (5) zusätzlich das optimale Beleuchtungsazimut $\phi(\bar{x})$ sowie der zugehörige Energieterm $E_G(\phi)$ auf. Im schätztheoretischen Sinne handelt es sich hierbei um einen sogenannten *nuisance parameter* [16], an den sinnvolle Forderungen gestellt werden können, die in die Schätzung der eigentlich interessierenden Größe $r(\bar{x})$ miteinfließen sollten. Man postuliert, daß sich das optimale Azimut $\phi(\bar{x})$ örtlich langsamer ändert als die sichtbar zu machende Oberflächentextur $t(\bar{x})$. Typischerweise handelt es sich bei der Textur $t(\bar{x})$ um ein Bandpaßsignal [5]. Um schädliche Wechselwirkungen zwischen $\phi(\bar{x})$ und der Textur $t(\bar{x})$ infolge der örtlichen Variation der Beleuchtungsrichtung zu vermeiden, wird $\phi(\bar{x})$ als Tiefpaßsignal angesetzt. Im Idealfall sollten die Träger der Fourierspektren $T(\bar{f})$ bzw. $\Phi(\bar{f})$ der Signale $t(\bar{x})$ bzw. $\phi(\bar{x})$ disjunkt sein:

$$\text{supp}\{T(\bar{f})\} \cap \text{supp}\{\Phi(\bar{f})\} = \emptyset. \quad (10)$$

Der zweite Summand $E_G(\phi)$ bestraft daher unzulässig hochfrequente Signalanteile von $\phi(\bar{x})$, indem er die Energie des hochpaßgefilterten Signals $\text{HP}\{\phi(\bar{x})\}$ wiedergibt. Dieser Summand stellt damit eine örtliche Glättheitsforderung für den optimalen Beleuchtungswinkel $\phi(\bar{x})$ dar.

Der erste Summand $E_D(D, r, \phi)$ in Gl. (9) sorgt für Datennähe von $r(\bar{x})$. Lokal soll $r(\bar{x})$ möglichst demjenigen Bild $d(\bar{x}, \phi_i)$ der Serie gleichen, das am Ort \bar{x} optimale Beleuchtungseigenschaften zeigt. Die Funktion $\gamma(\phi_i - \phi(\bar{x}))$ läßt im ersten Energieterm nur das bestgeeignete $d(\bar{x}, \phi_i)$ und dessen Nachbarn eingehen.

Der dritte Summand $E_K(r)$ bewertet, ob das lokale, mit der Bildqualität monoton wachsende Gütekriterium $K\{\cdot\}$, z.B. ein lokales Kontrastmaß, möglichst global im Fusionsresultat $r(\bar{x})$ hohe Werte erzielt.

Die simultane Minimierung von E bezüglich $r(\bar{x})$ und $\phi(\bar{x})$ liefert das unter den getroffenen Annahmen optimale Fusionsergebnis. Wegen des damit verbundenen sehr hohen Rechenaufwandes wird eine *effiziente Approximation* vorgeschlagen, die auf einer getrennten Minimierung der Summanden der Energiefunktion (9) ohne

Rücksicht auf die Gewichtungsfaktoren λ_i basiert; siehe Bild 4.

3.3.1 Effiziente Minimierungsstrategie

Im ersten Schritt wird das Signal

$$\tilde{\phi}(\bar{x}) = \arg \max_{\phi_i} K\{d(\bar{x}, \phi_i)\} \quad (11)$$

berechnet, das Auskunft über denjenigen Parameterwert gibt, welcher das lokale Kriterium K maximiert. Dies führt im wesentlichen zu einer Minimierung des dritten Summanden $\propto E_K(r)$. Um einen möglichst hohen Kontrast zu erzielen, eignen sich als Kriterien K die lokale Grauwertvarianz, der lokale mittlere Gradientenbetrag und die lokale Entropie. Bei anderen Problemstellungen, wo komplexe Texturen zu erfassen sind, die aus mehreren Teilt Texturen bestehen, kann es sinnvoll sein, o.g. Kriterien in Kombination mit merkmals- oder richtungsselektiven Filtern zu verwenden; siehe z.B. [3].

Im nächsten Schritt wird das Signal $\tilde{\phi}(\bar{x})$ durch ein Tiefpaßfilter geglättet:

$$\phi(\bar{x}) = \angle \text{TP}\{e^{j\tilde{\phi}(\bar{x})}\}. \quad (12)$$

Dadurch wird im wesentlichen der zweite Summand $\propto E_G(\phi)$ minimiert. Als Tiefpaßfilter wird ein Binomialfilter verwendet, da es im Ortsbereich sehr effizient implementiert werden kann [9] und eine Näherung für ein kontinuierliches Gaußfilter darstellt. Gaußfilter haben im Eindimensionalen die hervorragende Eigenschaft, bei der Glättung von Signalen keine neuen Extrema zu generieren. Zwar überträgt sich diese Eigenschaft nicht auf mehrdimensionale Gaußfilter, jedoch verhalten auch diese sich besonders gutartig in bezug auf die Entstehung von Artefakten [12]. Bei der Filterung von $\tilde{\phi}(\bar{x})$ muß außerdem die Zyklizität von ϕ beachtet werden, da $\phi = \phi + 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ gilt. Deshalb glättet man nicht $\tilde{\phi}(\bar{x})$ direkt, sondern den Zeiger $\exp(j\tilde{\phi}(\bar{x}))$ und erhält $\phi(\bar{x})$ als Winkel des komplexen Resultates [15].

Die eigentliche Fusion erfolgt durch gewichtete Überlagerung maximal zweier, bezüglich ϕ benachbarter Bilder $d(\bar{x}, \phi_i)$ mit Hilfe eines linearen Interpolators für γ . Dies führt zu einer Minimierung vor allem des ersten Summanden. Das Fusionsresultat ergibt sich zu:

$$r(\bar{x}) = \frac{\phi(\bar{x}) - \phi_l}{\phi_{l+1} - \phi_l} d(\bar{x}, \phi_l) + \frac{\phi_{l+1} - \phi(\bar{x})}{\phi_{l+1} - \phi_l} d(\bar{x}, \phi_{l+1}),$$

$$\phi_l \leq \phi(\bar{x}) \leq \phi_{l+1}. \quad (13)$$

Die Interpolation sorgt für glattes Überblenden zwischen bzgl. ϕ benachbarten Bildern. Die schmale Ausdehnung von $\gamma(\cdot, \cdot)$ sorgt dafür, daß nicht die Grauer-

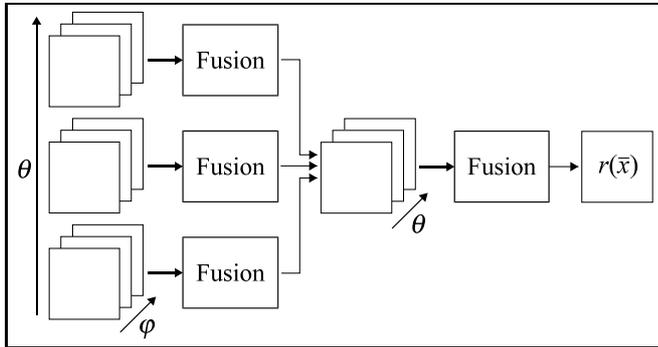


Bild 5: Fusion von ϕ, θ -Beleuchtungsserien.

te von sehr unterschiedlich beleuchteten Bildern gemittelt werden. Hier könnten Licht und Schatten bei der Sichtbarmachung reliefartiger Oberflächenstrukturen ihre Rollen tauschen, was dann zu einer für den Kontrast schädlichen Überlagerung führen würde.

Es sei darauf hingewiesen, daß es durchaus praktische Aufgabenstellungen aus dem Bereich der automatischen Sichtprüfung gibt, für die Gl. (10) nicht sinnvoll postuliert werden kann. Des weiteren lassen sich Fälle konstruieren, bei denen die sequentielle suboptimale Minimierung nach Bild 4 zu unerwünschten Effekten führt, die durch direkte Minimierung des Energiefunktional vermieden werden könnten.

3.3.2 Fusion von ϕ, θ -Beleuchtungsserien

Für den allgemeineren Fall, daß man sowohl das Azimut als auch den Elevationswinkel variiert, muß in Gl. (9) die Funktion γ zu $\gamma(\phi(\bar{x}), \vartheta(\bar{x}), \phi_i, \theta_i)$ erweitert und der Summe ein Energieterm $\lambda_3 E_G(\vartheta)$ hinzugefügt werden:

$$E = E_D(D, r, \phi, \vartheta) + \lambda_1 E_G(\phi) + \lambda_2 E_K(r) + \lambda_3 E_G(\vartheta). \quad (14)$$

$\gamma(\phi, \vartheta, \phi_i, \theta_i)$ ist eine unimodale, eng um (ϕ, ϑ) konzentrierte Funktion in ϕ und ϑ , die zur Fusion nur Bilder $g(\bar{x}, \phi_i, \theta_i)$ aus einer ϕ, θ -Nachbarschaft um die lokal günstigste Beleuchtungsrichtung $(\phi(\bar{x}), \vartheta(\bar{x}))$ zuläßt. $\vartheta(\bar{x})$ hat die Bedeutung des lokal besten Elevationswinkels der Beleuchtung. An $\vartheta(\bar{x})$ sind die gleichen Glattheitsanforderungen wie bei $\phi(\bar{x})$ zu stellen.

Bei geeigneter Erfassung von ϕ, θ -Beleuchtungsserien kann die praktische Realisierung der Fusion vereinfacht werden; siehe Bild 5. Zunächst gewinnt man für bestimmte Elevationswinkel $\theta_i, i = 0, \dots, n$ jeweils Beleuchtungsserien durch Variation des Azimuts ϕ . Im ersten Schritt werden sämtliche Bildserien bzgl. ϕ verschmolzen. Dabei entsprechen die einzelnen Fusionsblöcke jeweils dem gesamten in Bild 4 dargestellten Verfahren zur merkmalsgestützten Bildfusion. Die resultierenden Bilder stellen eine neue Bildserie dar, deren Fusion bzgl. θ zum Ergebnisbild $r(\bar{x})$ führt.

3.4 Fusion von Fokussereien

Bei Fokussereien kann man analog zu Beleuchtungsserien bzgl. ϕ verfahren, wenn man in Gl. (9) das optimale

Azimut $\phi(\bar{x})$ durch die optimale Gegenstandsweite $\xi(\bar{x})$ und die Winkel ϕ_i durch tatsächlich angefahrene Gegenstandsweiten ζ_i ersetzt:

$$E = E_D(D, r, \xi) + \lambda_1 E_G(\xi) + \lambda_2 E_K(r). \quad (15)$$

Die qualitative Bedeutung der Energieterme bleibt die gleiche wie im Falle der Bildserien mit variabler Beleuchtung. Insbesondere muß auch hier 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 Bildausschnitte der Serie

$$D = \{d(\bar{x}, \zeta_i), i = 0, \dots, n\}$$

sind bei geringer Schärfentiefe δz der Einzelbilder auch ohne telezentrische Optik zwangsläufig näherungsweise gleich, da der Schärfebereich bei einer festen Gegenstandsweite liegt.

3.5 Abwicklung

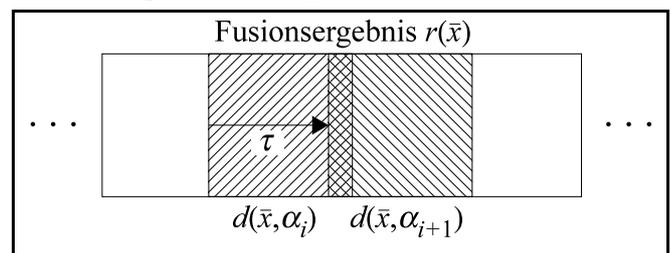
Um ein Bild der gesamten Manteloberfläche annähernd zylindrischer Objekte – wie z.B. Projektil – zu erhalten, wird eine Bildserie

$$D = \{d(\bar{x}, \alpha_i), i = 0, \dots, n\}, \quad \alpha_i = \alpha_0 + i\Delta\alpha \quad (16)$$

erfaßt, bei der das Objekt nach jeder Aufnahme um das Winkelinkrement $\Delta\alpha$ weitergedreht wird, wobei benachbarte Bilder teilweise überlappen; siehe Bild 6. Zwar sind durch Vorgabe der $\Delta\alpha$ die Verschiebungen τ zwischen zwei Bildern näherungsweise bekannt; für eine exakte Aneinanderreihung der Serie ist es jedoch erforderlich, mittels Kreuzkorrelation der Überlappungstreifen die Verschiebungen τ genauer zu bestimmen [1], um Ungenauigkeiten der mechanischen Positionierung zu kompensieren. Die grobe Vorabkenntnis von τ kann dabei zur Rechenzeitersparnis genutzt werden.

Damit ein zuverlässiger Bildvergleich erfolgt, muß $\Delta\alpha$ so klein gewählt werden, daß sich weder die Aufnahmegeometrie des Überlappungstreifens noch dessen Beleuchtung in beiden Aufnahmen wesentlich unterscheiden. Im Überlappungsbereich wird eine gewichtete

Bild 6: Prinzip der Abwicklung.



Mittelung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern vorgenommen, so daß kleine Grauwertschwankungen unterdrückt werden und ein fließender Bildübergang erfolgt.

Es ist klar, daß bei Objekten, die bezüglich der Rotationsachse nicht sternförmig sind, durch das vorgestellte Verfahren aufgrund von Selbstokklusionen i. allg. nicht sämtliche Oberflächenbereiche erfaßt werden können.

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.

Der Aufbau des Beleuchtungssystems basiert auf einer Vorrichtung, die zur Erkennung von Oberflächenmerkmalen und -defekten entwickelt wurde [13]. Das System besteht aus einer Grundplatte, in der 256 superhelle, individuell ansteuerbare, dimmbare, hexagonal angeordnete, gerichtet strahlende LEDs angebracht sind. Über einen Parabolspiegel (Rotationsparaboloid) wird das von den LEDs ausgestrahlte Licht in den Brennpunkt des Parabolspiegels geleitet, wo sich das zu erfassende Objekt befindet; siehe Bild 7. Über eine am Parabolspiegel angebrachte Öffnung kann das Objekt mit Hilfe eines Makroskops und einer CCD-Kamera erfaßt werden.

Die Lage einer LED auf der Grundplatte bestimmt Azimut φ und Elevationswinkel 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 die Positionierung des zu erfassenden Objekts in x -, y - und z -Richtung mit einer Genauigkeit von $0,5\mu\text{m}$. Ein Schrittmotor mit einer Winkelschrittauflösung von ca. $0,36^\circ$ erlaubt die rotatorische Positionierung des Objektes.

4.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden experimentelle Ergebnisse gezeigt, die mit den vorgestellten Fusionsansätzen er-

zielt wurden. Sämtliche Bilder einer Serie haben eine Größe von 512×512 Pixeln und wurden mit 8 Bit quantisiert.

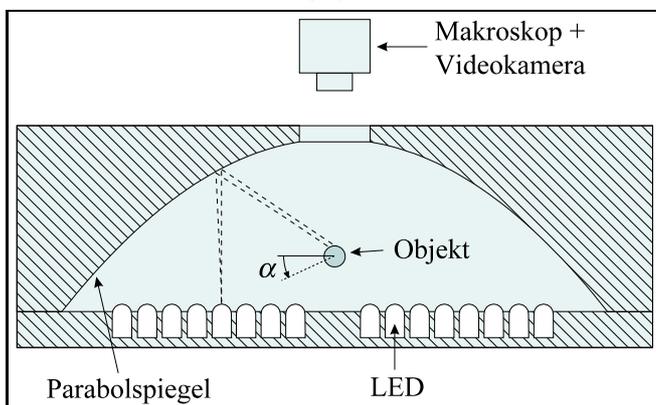
In Bild 8 sind links vier von insgesamt 20 Aufnahmen einer Beleuchtungsserie eines Schlagbolzeneindrucks im Zündhütchen einer Patronenhülse zu sehen. Bei der Serie wurde eine Beleuchtungssequenz verwendet, bei der der Elevationswinkel θ des einfallenden Lichtstrahles über die ganze Serie konstant blieb; das Azimut φ hingegen wurde von Bild zu Bild um $\Delta\varphi = 18^\circ$ erhöht. Das Ergebnis der Fusion ist im mittleren Bild dargestellt. Zur Fusion wurde als Kriterium K die lokale Grauwertvarianz in einer gleitenden Maske der Größe 5×5 berechnet. Die Glättung des Signals $\tilde{\varphi}(\bar{x})$ erfolgte anhand eines zirkularen Binomialfilters mit einer Impulsantwort der Größe 49×49 . Zur visuellen Beurteilung des Fusionsergebnisses wurde das gleiche Objekt mit homogener Beleuchtung erfaßt; siehe Bild 8 rechts. Beim Vergleich beider Bilder fällt auf, daß im homogen beleuchteten Bild viele relevante Merkmale im Bereich des Schlagbolzeneindrucks nicht mehr sichtbar sind. Dagegen sind sämtliche im homogen beleuchteten Bild vorhandenen Merkmale auch im fusionierten Bild erkennbar.

Bild 9 zeigt links sechs von 20 Bildern einer Fokussiererei eines Schußwaffenprojektils, die durch schrittweise Änderung der Gegenstandsweite ($\Delta z = 78,5\mu\text{m}$) gewonnen wurden. Sämtliche Bilder der Serie wurden bei homogenen Beleuchtungsverhältnissen erfaßt. K wurde wie bei Bild 8 gewählt. Die Tiefenkarte $\tilde{\zeta}(\bar{x})$ wurde durch ein Binomialfilter der Größe 21×21 geglättet. Im Fusionsergebnis Bild 9 rechts erkennt man, daß – im Gegensatz zu den Bildern aus der Serie – sämtliche Oberflächenbereiche scharf enthalten sind. Durch die Fusion wurde eine virtuelle Erhöhung der Schärfentiefe erreicht.

Als Beispiel zur Gewinnung des gesamten Mantelabildes annähernd zylindrischer Objekte ist in Bild 11 das Ergebnis der Fusion einer Bildserie des vorderen Bereiches des in Bild 10 dargestellten 3-Zahn-Flachsenkers zu sehen. Als Winkelinkrement wurde $\Delta\alpha = 1,8^\circ$ gewählt. Um die Schärfentiefe zu erweitern, wurde für jede Winkelstellung eine Fokussiererei aus 20 Bildern mit $\Delta z = 210,5\mu\text{m}$ erfaßt und genauso wie bei der oben erläuterten Fokussiererei verschmolzen. Die Fusionszwischenenergebnisse wurden dann zu einem Gesamtmantelbild zusammengefügt; siehe Bild 11. Man beachte, daß auch tief im Werkzeug liegende Bereiche scharf abgebildet wurden. Im rechten Drittel ist der Ausbruch einer Werkzeugschneide deutlich zu erkennen.

In Bild 12 ist ein Ausschnitt des Fusionsergebnisses einer Bildserie des Projektilmantels gezeigt. Zur Gewinnung dieses Bildes wurde eine Serie verschmolzen, bei der der Elevationswinkel der Beleuchtung 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 wurden. Für jede eingestellte Gegenstandsweite wurde eine Beleuchtungsserie durch Berechnung der lokalen Grauwertvarianz als Kriterium K fusioniert. Die Signale $\tilde{\theta}(\bar{x})$ wurden mittels eines Binomialfilters der

Bild 7: Aufbau des Beleuchtungssystems.



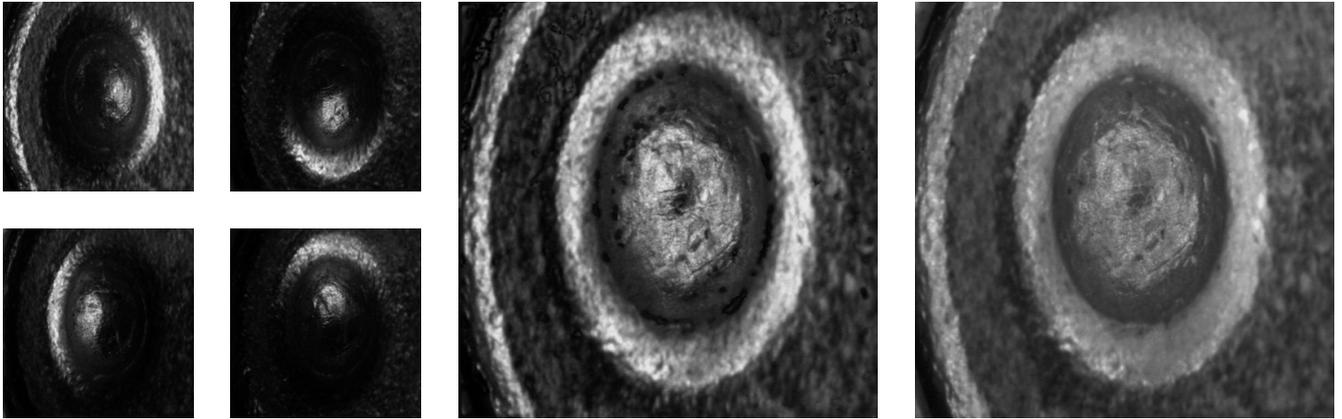


Bild 8: Schlagbolzeneindruck; links: Beleuchtungsserie (Bilder 0, 5, 10 und 15); mitte: Ergebnis der Fusion (Kriterium K : Varianzberechnung in einer 5×5 -Umgebung; Glättung von $\varphi(\bar{x})$ mit einem 49×49 -Binomialfilter); rechts: homogene Beleuchtung.

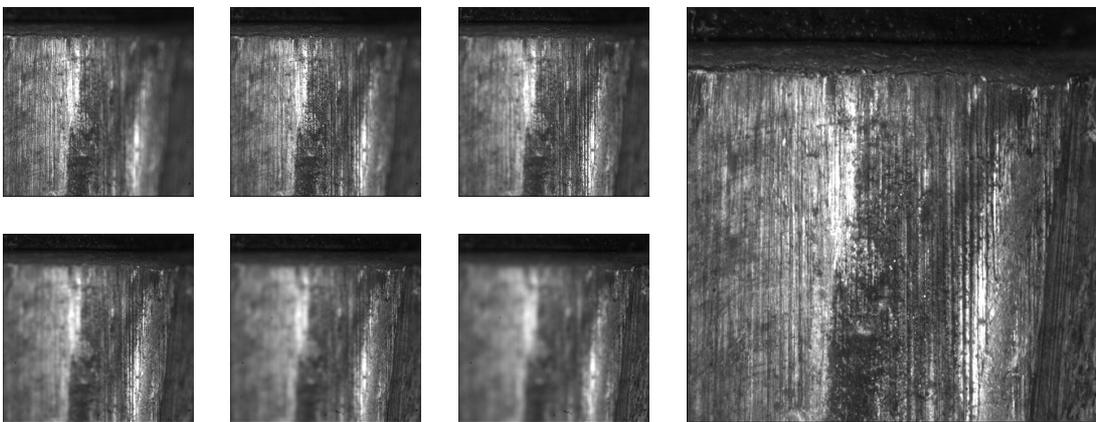


Bild 9: Projektil; links: Fokussierserie (Bilder 2, 5, 8, 11, 14 und 17); rechts: Ergebnis der Fusion (Kriterium K : Varianzberechnung in einer 5×5 -Umgebung; Glättung von $\zeta(\bar{x})$ mit einem 21×21 -Binomialfilter).



Bild 10: 3-Zahn-Flachsenker.



Bild 11: Ergebnis der Abwicklung eines 3-Zahn-Flachsenkers in Umfangsrichtung.



Bild 12: Ergebnis der Abwicklung des Mantels eines Projektils in Umfangsrichtung. Dargestellt sind ca. 30% des Mantelumfanges. Das Gesamtbild umfaßt 5018×512 Pixel!

Größe 49×49 geglättet. Die übrigen Fusionsparameter wurden wie bei der Verschmelzung des Flachsenkers gewählt. Beim Vergleich mit dem in Bild 9 dargestellten Projektil fällt hier der gleichmäßigere Kontrast aufgrund der Variation der Beleuchtung auf.

5 Zusammenfassung

Es wurde eine Methodik zur Fusion von Bildserien, die durch systematische Änderung der Aufnahme-situation gewonnen wurden, präsentiert. Das Fusionsproblem wird dazu in Form einer Energiefunktion formuliert. Deren Summanden beschreiben einerseits den gewünschten oder bekannten Zusammenhang zwischen den Einzelbildern $d(\bar{x}, \bar{\omega}_i)$ und dem Fusionsresultat $r(\bar{x})$ und andererseits die gewünschten oder bekannten Eigenschaften von $r(\bar{x})$ und etwaigen problemrelevanten Hilfsgrößen. Durch Minimierung der Energiefunktion erhält man das unter den getroffenen Annahmen optimale Fusionsresultat. In unserem Falle erlaubt die Struktur der Energiefunktion, daß die ansonsten sehr aufwendige Optimierungsrechnung durch getrennte Minimierung der Summanden zufriedenstellend approximiert werden kann, was auf eine nichtiterative, effiziente Verarbeitung der Bildserie führt. Als Ergebnis der Fusion erhält man qualitativ hochwertige Bilder, die in einer einzigen Aufnahme physikalisch nicht realisierbar sind.

Die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren wurde anhand von Bildern von Projektilmänteln, Schlagbolzeneindrücken an verfeuerten Patronenhülsen und Werkzeugen demonstriert. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, daß der erhöhte Aufwand bei der Bildakquisition in vielen Bereichen der automatischen Sichtprüfung, vor allem aber in der Kriminaltechnik, durchaus gerechtfertigt ist, weil dadurch die für die spätere Bildauswertung wesentlichen Merkmale robuster und somit reproduzierbarer erfaßt werden können.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Mesch und Herrn Dipl.-Ing. T. Engelberg für viele anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise. Ihr Dank gilt gleichermaßen Herrn Dipl.-Ing. Christof Baschang und Herrn Dipl.-Ing. Bernd Müller für ihren Beitrag bei der Implementierung der hier vorgestellten Verfahren.

Literatur

- [1] *Bähr, H. P. und Vögtle, T.*: Digitale Bildverarbeitung. Wichmann Verlag, Karlsruhe (1991).
- [2] *Batchelor, B. G.; Hill, D. A. und Hodgson, D. C.*: Automated Visual Inspection. IFS (Publications) Ltd., UK (1985).
- [3] *Beyerer, J.*: Suppression of stochastically placed, straight toolmarks to enhance objects and defects. *Technisches Messen* 59, Nr. 10, 389–397 (1992).
- [4] *Beyerer, J. und Puente León, F.*: Bildverarbeitungsverfahren für die Kriminaltechnik zur Identifikation von Schußwaffen. BKA-Symposium der AG Schußwaffen/Ballistik, Ludwigshafen, 18.–20. September (1995).
- [5] *Beyerer, J. und Puente León, F.*: Suppression of inhomogeneities in images of textured surfaces. *Optical Engineering* 36, No. 1, 85–93 (1997).
- [6] *Burt, P. J. und Kolczynski, R. J.*: Enhanced Image Capture Through Fusion. *Proc. Fourth Int. Conf. on Comp. Vision*, 173–182, IEEE Comp. Soc. Press, Washington, DC (1993).
- [7] *Häusler, G. und Körner, E.*: Abbildung mit erweiterter Schärfentiefe. *Zeiss Informationen*, Oberkochen, 29, 9–13 (1986).
- [8] *Clark, J. J. und Yuille, A. L.*: *Data Fusion for Sensory Information Processing Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston (1990).
- [9] *Jähne, B.*: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1989).
- [10] *Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D. Jr. und Vecchi, M. P.*: Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680 (1983).
- [11] *Krotkov, E. P.*: *Active Computer Vision by Cooperative Focus and Stereo*. Springer-Verlag, New York (1989).
- [12] *Lindeberg, T.*: *Scale-Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, Boston (1994).
- [13] *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).
- [14] *Malz, R.*: *Codierte Lichtstrukturen für 3-D-Meßtechnik und Inspektion*. Dissertation, Universität Stuttgart (1992).
- [15] *Mardia, K. V.*: *Statistics of Directional Data*. Academic Press, London (1972).
- [16] *Scharf, L. L.*: *Statistical Signal Processing, Detection, Estimation, and Time Series Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company (1991).
- [17] *Tarbox, G. H. und Gottschlich, S. N.*: Planning for Complete Sensor Coverage in Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, No. 1, 84–111 (1995).
- [18] *Tikhonov, A. und Arsenin, V.*: *Solutions of Ill-Posed Problems*. Winston, Washington, DC (1977).
- [19] *Yi, S.; Haralick, R. M. und Shapiro, L. G.*: Optimal Sensor and Light Source Positioning for Machine Vision. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, No. 1, 122–137 (1995).

Manuskripteingang: 17. Januar 1997.