

Adaptive Rasterreduktion durch spektrale Ausblendung in Aufnahmen von flexiblen Endoskopen

Christian Winter^{1,2}, Stephan Rupp², Christian Münzenmayer²,
Klaus Spinnler², Heinz Gerhäuser^{1,2} und Thomas Wittenberg²

¹Lehrstuhl für Informationstechnik, Erlangen

²Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Erlangen

Email: winter@like.e-technik.uni-erlangen.de

Zusammenfassung. Neue Verfahren in der medizinischen Diagnostik und Therapie machen den Einsatz von Fiberskopen mittlerweile unverzichtbar. Diese Endoskope zeichnen sich aus durch einen flexiblen Bildleiter, der aufgrund seiner begrenzten Faseranzahl zu einer Unter- und Überabtastung der Bildinformation zwischen Szene und Sensor (Auge) beiträgt. Daraus resultiert eine wabenförmige Struktur, die über dem betrachteten oder aufgezeichneten Bild liegt. Um die Weiterverarbeitung für Computeranwendungen nicht zu beeinträchtigen, wird dieser Effekt durch eine spektrale Nachverarbeitung der Aufnahmen reduziert. Der vorliegende Beitrag beschreibt Voraussetzungen und Theorie zur optimalen Rekonstruktion der Bilddaten aus fiberskopischen Aufnahmen und vergleicht die Ergebnisse bei konkreter Anwendung.

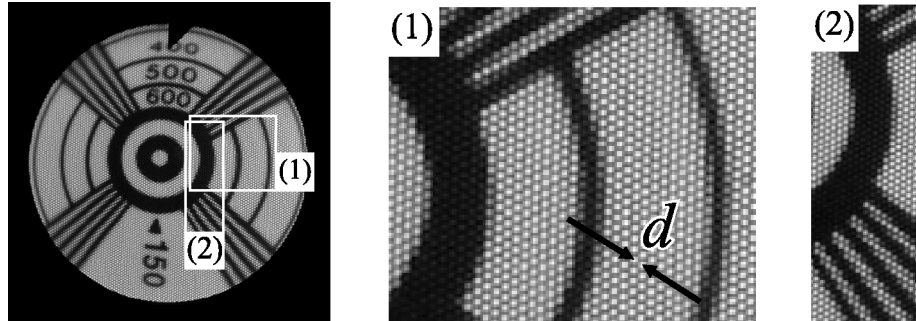
1 Problemstellung

In vielen Bereichen der medizinischen Diagnostik, Behandlung und Forschung spielen halbstarre und biegsame Endoskope (sog. „Fiberskope“) aufgrund ihrer Flexibilität und geringen Arbeitsdurchmesser eine bedeutende Rolle. Der flexible Bildleiter aktueller Fiberskope besteht typischerweise aus einem geordnetem Glasfaserbündel oder ist aus Quarz gefertigt. Hochwertige Glasfaserbündel zeigen entsprechend ihrer Kern-Mantel-Struktur in ihrer Anordnung eine bildweite Homogenität und besitzen klare Bildpunkte mit einer ausgeprägten dunklen Umrandung, der sog. „Wabenstruktur“ (siehe Abb. 1). Im Querschnitt eines Quarzbildleiters hingegen können einzelne Fasern unregelmäßige Querschnitte aufweisen und verschiedene Flächenabschnitte eine unterschiedliche Orientierung in der Anordnung besitzen (siehe Abb. 3).

Die bei der faseroptischen Übertragung durch Unter- und Überabtastung (siehe Abschnitt 4) hervorgerufene Rasterstruktur kann zwar bei kleiner Apertur vom menschlichen Auge kompensiert werden, führt jedoch bei der Weiterverarbeitung der Bilddaten mit Computern zwecks Rekonstruktion zu erheblichen Fehlern.

Dieser Beitrag wendet die Theorie des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems (vgl. [1]) auf Abbildungen mit Glasfasersystemen an, beschreibt darauf aufbauend

Abb. 1. Typische Abbildung durch ein Fiberskop (links). Stark vergrößerte Ausschnitte zeigen homogene Wabenstruktur bei Verwendung eines Glasfaser-Endoskops.



ein adaptives Verfahren, um geeignete Filter zur optimalen Eliminierung der Raster-Struktur automatisch zu erstellen und präsentiert die Wirkungsweise an konkreten Aufnahmen.

2 Stand der Forschung

Zur Reduktion der Rasterstruktur in Bildleitersystemen mit Glasfaser-Technik wurde 1993 von Eikelmann, Keller und Pfeifer ein Verfahren [2] vorgestellt, welches die automatische, bildgestützte Zuordnung von Eingangs- zu Ausgangsglasfasern beschreibt. Bröcher stellte darauf aufbauend einen Interpolationsalgorithmus [3] vor, der die Intensität einer jeden Faser gemäß ihres Flächenanteils auf ein Raster verteilt. Das Verfahren zeigt klare visuelle Ergebnisse und eignet sich besonders zur Kompensation von Produktionsfehlern oder Beschädigungen im Glasfaserstrang, die sich durch Ausfälle einzelner Glasfasern auszeichnen (sog. „Faserbruch“). Allerdings ist die Detektion und Indizierung der Glasfasermittelpunkte auf dem Sensorbild mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass sich die Anordnung von Sensor und Bildleiter nach der automatischen Zuordnung nicht verändert. Diese Voraussetzung kann im realen Einsatz während einer Diagnose bzw. Therapie kaum gewährleistet werden, weshalb die aufwändige Kalibrierung regelmäßig wiederholt werden müsste.

In der Literatur finden sich noch weitere Ansätze, die unerwünschte Wabenstruktur zu entfernen. Zu nennen sind dabei parametrisierte Rechteck-Filter, Bandpass-Strukturen, Gausspyramiden, sowie mehrdimensionale Diffusionsansätze [4]. Letztere wurden für eine spezielle physikalische Anwendung zur Strömungsmessung entwickelt und können daher nur bedingt für die vorliegende Anwendung übertragen werden. Zudem beruhen die dargelegten Verfahren stets auf einer manuellen Einstellung der notwendigen Parameter und sind damit zur automatisierten Anwendung der Algorithmik wenig geeignet.

3 Fortschritt durch den Beitrag

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Rekonstruktion von komplexen Hohlräumen aus monokularen fiberskopischen Ansichten [5] ist das Ziel der digitalen Vorverarbeitung des Bildmaterials zum einen die Verbesserung des subjektiven Empfindens beim Betrachten der Aufnahmen. Zum anderen soll die Bild-Informationen für beabsichtigte Rekonstruktionsaufgaben mit Computern optimiert werden. Dabei spielen korrespondierende Merkmale eine große Rolle, deren Erkennung durch hochfrequente Anteile der Wabenstruktur in Aufnahmen von Fiberskopen behindert wird. Insbesondere führen falsch dimensionierte Filter zu einer unnötigen Abschwächung wichtiger Details im Bild.

Mit diesem Beitrag wird deshalb das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem aufgegriffen und unter angegebenen Randbedingungen ein theoretisches Optimum für die Bildfilterung entwickelt. Die darauf aufbauende adaptive Filter-Generierung ist in der Lage, unabhängig von bautechnischen Parametern eines flexiblen fiberskopischen Bildleitersystems, wie Arbeitsdurchmesser, Faseranzahl oder Struktur eines Bildleiterbündels die Bildqualität sowohl für den visuellen Einsatz, als auch für die sich anschließende Algorithmik zu optimieren.

4 Methoden

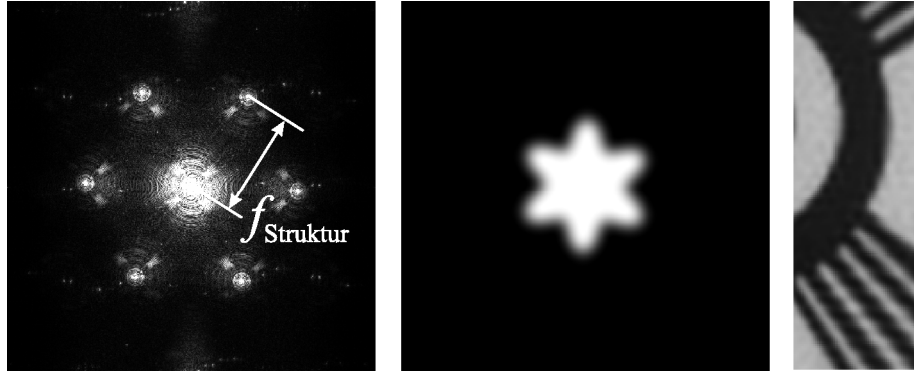
Die Darstellung einer Bildszene $b(x, y)$ durch ein flexibles Endoskop auf einem Videosensor muss in zweierlei Hinsicht als Abtastung betrachtet werden. Einerseits wird die übertragene Bildinformation einer betrachteten Szene durch den Bildleiter von der Anzahl der meist regelmäßig angeordneten Fasern und deren Abstand d untereinander begrenzt (Unterabtastung). Andererseits besitzt auch der Sensor nur eine endliche Auflösung mit der Pixelbreite als Gitterkonstante, die allerdings deutlich feiner ist als die des Bildleiters (Überabtastung).

Übliche Glasfasern übertragen jeweils genau einen Helligkeitswert vom Objekt zum Okular bzw. zum Sensor. Aus einer periodischen Anordnung der Fasern im Abstand d resultiert im Fourierspektrum ein Frequenz-Anteil an der Stelle $f_{\text{Struktur}} = 1/d$ (siehe Abb. 2). Der niederfrequente Anteil des übertragenen Bildes erstreckt sich um den Mittelpunkt des Spektrums (Gleichanteil). Gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem darf dessen maximale Frequenz f_0 die halbe Abtastfrequenz (nämlich durch das Raster der Glasfasern) nicht überschreiten, um bei der Abtastung keine Verluste zu erleiden: $f_0 = \frac{f_{\text{Struktur}}}{2}$.

Die Spektralbereiche von Bild und Wabenmuster können in diesem Fall idealer Weise mit einer im 2-dimensionalen zum Kreis erweiterten Rechteckfunktion mit der Grenzfrequenz f_0 getrennt werden. Ein entsprechender Masken-Filter kann automatisch aus der spektralen Darstellung eines Referenzbildes $b_r(x, y)$ generiert werden (Operator \mathcal{M}). Das resultierende Bild $b'(x, y)$ berechnet sich somit aus

$$\begin{aligned} b'(x, y) &= \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(b(x, y)) \cdot m(i, j)) \\ m(i, j) &= \mathcal{M}(\mathcal{F}(b_r(x, y))) \quad \text{mit } m \in \{0, 1\}. \end{aligned}$$

Abb. 2. Fourierspektrum der endoskopischen Aufnahme aus Abb. 1 (links). Die Hexagonal-Struktur der Glasfasern führt hier zu einer radial-symmetrischen Anordnung von sechs Frequenzbereichen. Generierte Sternmaske zur spektralen Ausblendung der Wabenstruktur (Mitte). Aufbereiteter Ausschnitt der vergrößerten Darstellung (2) aus Abb. 1 (rechts).



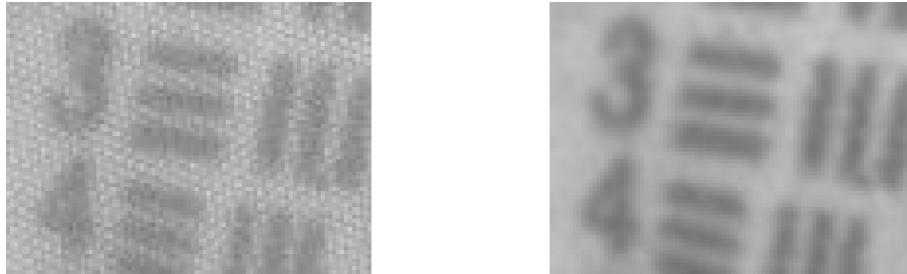
Zur Eliminierung der homogenen Wabenstruktur in Aufnahmen von Glasfaserendoskopen wurde zusätzlich eine rotations-variante Form der Maske in Form eines sechs-zackigen Sterns (Abb. 2) entworfen, welche die gleiche mittlere Grenzfrequenz f_0 aufweist, wie die zugrundeliegende Kreismaske. Damit wird die konzentrierte Anordnung von Frequenzanteilen einer bildweit regelmäßigen Wabenstruktur adäquat berücksichtigt. Für den sternförmigen Maskentyp wurde außerdem eine geglättete Version mit „weichen“ Übergängen (m im Intervall $[0, 1]$) an den Grenzfrequenzen untersucht.

5 Ergebnisse

Das beschriebene Verfahren wurde an mehreren hundert Aufnahmen (8-Bit-Graustufen) verschiedener Fiberskope evaluiert. Abbildung 3 vergleicht zwei Aufnahmen aus Quarzfaser-Endoskopen, die jeweils nach dem in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren (Adaptive Rasterreduktion durch spektrale Ausblendung) gefiltert wurden. An Aufnahmen mit Glasfaser-Endoskopen zeigten geglättete sternförmige Masken die besten Resultate nach subjektiver Einschätzung.

Mit dem beschriebenen Ansatz kann die technisch bedingte Überlagerung einer Wabenstruktur in Aufnahmen mit flexiblen Endoskopen im informationstheoretischen Sinne bestmöglich reduziert werden. Auch für rein visuelle Anwendungen im klinischen Alltag bietet das Verfahren eine viel versprechende Vorverarbeitung der Bilddaten. Für die adaptive Generierung entsprechender Filter werden die aktuelle Konfiguration und Parameter des eingesetzten Endoskops durch Auswerten eines Referenzspektrums berücksichtigt.

Abb. 3. Aufnahme eines Testkörpers (USAF-Chart) durch ein flexibles Fiberskop mit Quarz-Bildleiter, links vor, rechts nach adaptiver Rasterreduktion durch spektrale Ausblendung.



6 Diskussion

Die erzielten Ergebnisse lassen darauf hoffen, dass sich der vorgestellte Ansatz zur Reduktion der Wabenstruktur in Aufnahmen von Fiberskopen bewährt, sowohl für den direkten visuellen Einsatz im medizinischen Umfeld als auch für die elektronische Weiterverarbeitung im Rahmen der angestrebten Module für eine dreidimensionale Rekonstruktion von Hohlräumen [5]. Das subjektive Empfinden muss qualitativ noch in einer größeren klinischen Studie durch Fachpersonal beurteilt werden. Nach Fertigstellung und Integration von Modulen zur Extraktion und Analyse von Bildmerkmalen werden auch Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Algorithmen hinsichtlich der 3-D-Rekonstruktion möglich sein.

Von optischer Seite her sollte überprüft werden, ob die Bandbegrenzung des Eingangsbildes gemäß dem Abtasttheorem nach Shannon eingehalten wird oder zu deren Gewährleistung ein entsprechender Diffus-Filter notwendig ist. Des Weiteren steht eine umfassende Untersuchung bevor, inwieweit sich eine Kalibrierung und Entzerrung der Sensordaten auf das verwendete Referenzspektrum auswirkt.

Danksagung. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 603 (TP A7) und dem Graduiertenkolleg 244 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literaturverzeichnis

1. Girod B, Rabenstein R, Stenger A. Einführung in die Systemtheorie. Teubner, Stuttgart; 1997.
2. Eikermann E, Keller S, Pfeifer T. Verfahren zur Darstellung eines in ein Lichtleiterbündel eingekoppelten Bildes. Patentschrift DE 43 45 278 C2; 1993.
3. Bröcher B. Berichte aus der Produktionstechnik. Shaker, Aachen; 2000.
4. Janßen Ch. Ein miniaturisiertes Endoskop-Stereomeßsystem zur Strömungsvisualisierung in Kiesbetten. Diplomarbeit, Universität Heidelberg; 2000.
5. Winter Ch, Spinnler K, Wittenberg Th. 5 Jahre Lehrstuhl für Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Kommunikationselektronik. H Gerhäuser (Hrsg.); 2004. p. 111–120.