

Farbkodierte objektangepasste Streifenprojektion für die schnelle 2D- und 3D-Qualitätsprüfung

Color-coded Object-adapted Fringe Projection for Two- and Threedimensional Quality Control

Tobias Haist, Hans J. Tiziani, Universität Stuttgart

Manuskripteingang: 28. Januar 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 07. Juni 2002.

Die Kontrolle von Werkstücken hinsichtlich ihrer dreidimensionalen Geometrie und ihrer Oberflächencharakteristik ist von entscheidender Bedeutung für die automatisierte industrielle Produktion. Vorgestellt wird ein schnelles und robustes Einzelbildverfahren, das es gestattet, gleichzeitig die Topographie zu kontrollieren und ein Videobild des Werkstückes zu generieren. Hierzu wird eine objektangepasste Streifenprojektion mit einer farbkodierten Maske verwendet. Zur Detektion können preiswerte Einzelchip-Farbkameras zum Einsatz kommen. Das Verfahren erzielt eine vergleichsweise gute 3D-Auflösung von 1/4000 bei einer hohen lateralen 2D- und 3D-Auflösung und ist weitgehend unempfindlich gegen lokale Verschmutzungen und Variation der Beleuchtung.

Industrial quality control requires fast and robust detection of the topography as well as the surface of objects. We present a fast single-frame method based on object-adapted fringe projection where a color mask is used in order to simultaneously obtain a video image as well as a map of the deviation of the topography. Color-coded projection in combination with detection by a consumer one-chip digital camera is employed for testing complex objects by simple means. An accuracy of 1/4000 in 3D together with a high lateral resolution is obtained. Additionally the method is quite immune against dirt and varying illumination conditions.

Schlagwörter: Streifenprojektion, kodierte Beleuchtung, Inverses Moiré, Triangulation, Computergeneriertes Moiré

1 Einleitung

Eine industriell weit verbreitete Technik zur schnellen dreidimensionalen Vermessung von Werkstücken ist die Streifenprojektion. Im Gegensatz zur einfachen Punkt- oder Lichtschnitttriangulation ergeben sich pro Kameraaufnahme flächenhafte 3D-Messwerte. Ein typischer Aufbau ist im Bild 1 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der von der Kamera detektierten Intensität $I(x, y)$, der projizierten Maske $m(x, y)$ und der Topographie des Objekts $z(x, y)$ kann durch

$$I(x, y) = A(x, y) \cdot [B(x, y) + m(\cos \alpha \cdot (x + z \tan \alpha), y)] \quad (1)$$

beschrieben werden. Dabei bezeichnet α den Triangulationswinkel (siehe Bild 1), $A(x, y)$ ist die lokale Reflektivität der Oberfläche und $B(x, y)$ gibt die lokale Helligkeit des Hintergrunds an.

Bei der Streifenprojektion werden üblicherweise gerade Streifen auf das Objekt projiziert. Am gebräuchlichsten sind binäre (z. B. Gray-Codes [1]) und sinusförmige [2–4] Streifenmuster. Bei der Auswertung werden die aufgrund der Topographie deformierten Streifen im Kamerabild in eine Höheninformation zurück gerechnet. Dies erfolgt meist anhand von mehreren Bildern, z. B. mittels N-Phasen-Algorithmus [2; 5]. Wenn $A(x, y)$ und $B(x, y)$ nicht im Voraus bekannt sind, kann die Höhe $z(x, y)$ nicht für *alle Pixel* aus einem einzelnen Bild ermittelt werden. Die Höhe

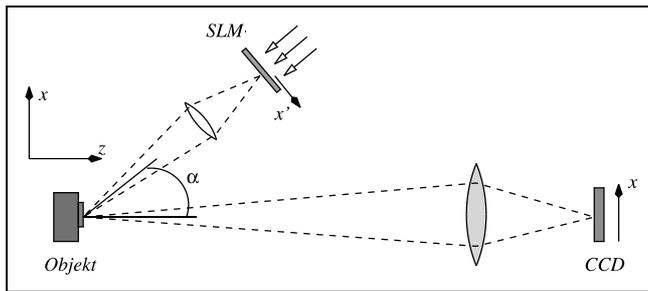


Bild 1: Aufbau zur Streifenprojektion.

$z(x, y)$ kann nach Gleichung (1) nur ermittelt werden, wenn mindestens drei (entsprechend den Unbekannten A , B und z) Messungen vorliegen.

Für viele industrielle Anwendungen muss nicht die dreidimensionale Form selbst, sondern lediglich die Abweichung der Form von einer Referenzform ermittelt werden. In diesem Fall ist es sinnvoll, statt der direkten dreidimensionalen Messung eine Differenzmessung durchzuführen. Zu diesem Zweck werden deformierte, an das Objekt angepasste Streifen projiziert. Diese „objektangepassten Streifen“ (alternative Bezeichnungen sind „Inverses Moiré“ und „Computergeneriertes Moiré“) führen zu geraden, äquidistanten Streifen auf der Kamera, falls das Objekt die korrekte Sollform aufweist. Lokale Topographiedefekte führen zu lokal deformierten Streifen, die sehr schnell und mit hoher Genauigkeit detektiert werden können.

Brook und Heflinger [6] haben bereits 1969 ein Gitter mit deformierten Streifen zur Moiré-Analyse eingesetzt. Yatagai und Itesawa [7] haben dieses Verfahren erweitert und ein Moiré-Verfahren publiziert, bei dem ein Gitter mit deformierten Streifen zur Projektion eingesetzt wurde. Lohmann und Po-Shiang [8] sowie Harthong und Annoni [9; 10] haben diesen Ansatz zur Messung von Formfehlern eingesetzt. Zu diesem Zeitpunkt war die Technik wenig praktikabel, da die Herstellung der objektangepassten Masken mit hohem Aufwand verbunden war.

In den letzten Jahren ist mit der Verbesserung kommerziell erhältlicher Lichtmodulatoren das Interesse an der objektangepassten Streifenprojektion stark gestiegen [11–16; 32]. Mit den inzwischen verfügbaren Elementen können preiswerte Formfehler-Prüfsysteme, die mit hoher Geschwindigkeit arbeiten, aufgebaut werden.

Im Vergleich zur konventionellen Streifenprojektion ergeben sich folgende Vorteile für den Formvergleich:

- Hohe, von der Kamera nicht aufzulösende Streifendichten werden vermieden.
- Durch eine zusätzliche Helligkeitsanpassung der Streifenmaske an das Objekt kann die Dynamik der Kamera besser genutzt werden.
- Die Bilder lassen sich digital und optisch sehr schnell auswerten und auf Wunsch zur Bildverbesserung sehr einfach filtern.

2 Verfahren

Grundidee des vorgestellten Verfahrens ist die spektrale Kodierung einer oder zweier objektangepasster Streifenmasken zusammen mit einer homogenen Projektion in einer Beleuchtungsmaske. Bei der Bildaufnahme mit einer Farbkamera kann dann sowohl ein Videobild für den 2D-Objektvergleich als auch ein (deformiertes) Streifenmuster für die Formkontrolle aus einem Kamerabild gewonnen werden.

Die Verwendung verschiedener Wellenlängen bei der kodierten Beleuchtung ist seit langem bekannt [17–23]. Die Hauptmotivation ist dabei die Einsparung von Kamerabilddern und so eine schnellere und problemlosere Messung der Objekttopographie.

Die bisherigen Messverfahren nutzen professionelle 3-Chip-Farbkameras. Digitale Fotokameras (kurz „Digitalkameras“) besitzen in der Regel lediglich einen Bildaufnehmer und führen im Vergleich zu 3-Chip-Farbkameras für die industrielle Messtechnik eine ganze Reihe von problematischen Verarbeitungsschritten aus. Diesen Nachteilen steht der um etwa den Faktor 10 geringere Preis der Consumer-Kameras entgegen. In Abschnitt 3 wird auf die sich beim Einsatz von Digitalkameras ergebenden Beschränkungen näher eingegangen.

Zusätzlich zur schnellen 2D- und 3D-Messaufnahme soll das Verfahren die Form unabhängig von Änderungen der Oberfläche, insbesondere Verschmutzungen und Beschriftungen, und externen Beleuchtungsvariationen erfassen.

Diese Immunität gegenüber lokalen Störungen (Beleuchtung und Oberfläche) lässt sich nur dadurch erzielen, dass mehrere Informationskanäle pro Pixel genutzt werden. Während bei der klassischen Mehrbildtechnik entsprechend mehrere Bilder mit variiert Projektion verwendet werden, benutzen Einzelbildverfahren in der Regel die Näherung einer lokalen Mittelung. Im hier vorgeschlagenen Verfahren werden die drei Kanäle einer Farbkamera zur Messung genutzt.

Um eine möglichst hohe Unempfindlichkeit gegenüber externen Störungen zu erreichen, werden lediglich drei Spektralbereiche genutzt. Eine objektunabhängige Unterscheidung von fünf bzw. sechs Farben (wie bei Paul und Stanke [22]) erscheint mit Consumer-Digitalkameras nicht realistisch und erhöht die Zahl der Fehlstellen. Zusätzlich wird innerhalb der drei Kanäle eine binäre Streifenprojektion verwendet, um die Störanfälligkeit weiter zu verringern. Hierdurch gewinnt man eine recht hohe Unempfindlichkeit der Messung gegenüber spektralen Obeflächenvariationen (farbige Objekte). Durch den Einsatz kontinuierlicher Codes (z. B. Sinusstreifen) lässt sich bei kooperativen Messszenen die Höhenauflösung zwar steigern, bei problematischen Szenen ist eine Auswertung dagegen kaum noch möglich.

Bild 2 zeigt eine typische Maske, die zur Projektion verwendet wird. Neben einem homogenen Grünkanal werden

im blauen und roten Kanal die objektangepassten Streifen kodiert. Diese wurden zuvor für ein Referenzobjekt einmalig ermittelt [32]. Der Grünkanal wird zur homogenen Projektion verwendet, um ein möglichst hoch aufgelöstes 2D-Videobild der Oberfläche zu erhalten.

Für reine 3D-Messungen kann auf den Grünkanal verzichtet werden. Die Messgenauigkeit lässt sich dann bei einfachen Objekte etwas steigern. Weiterhin zeigt sich für die verwendete Kamera (Olympus Camedia C3000), dass der Blaukanal gegenüber dem Rotkanal ein verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis aufweist. Für unbunte Objekte ist es damit sinnvoll, die 3D-Messung anhand des Blau- und Grünkanals vorzunehmen und auf die roten Streifen zu verzichten.

3 Einsatz von digitalen Consumer-Kameras

Der grundsätzliche Aufbau einer Digitalkamera entspricht dem einer analogen Kleinbildkamera mit optischem Sucher, bei der der herkömmliche Film durch einen Farb-CCD-

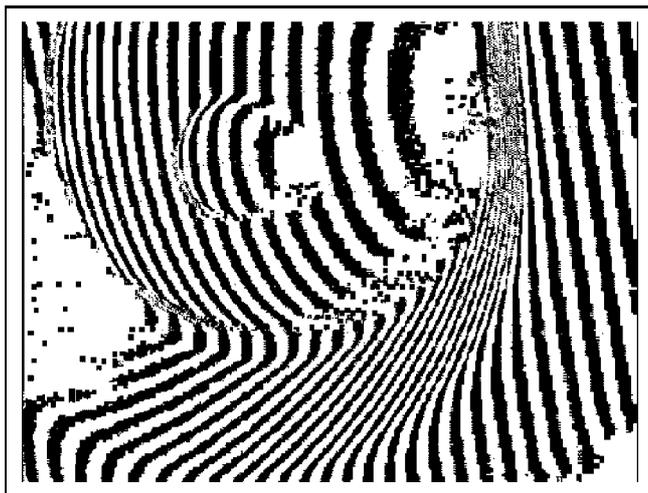


Bild 2: Projizierte Farbmaske.

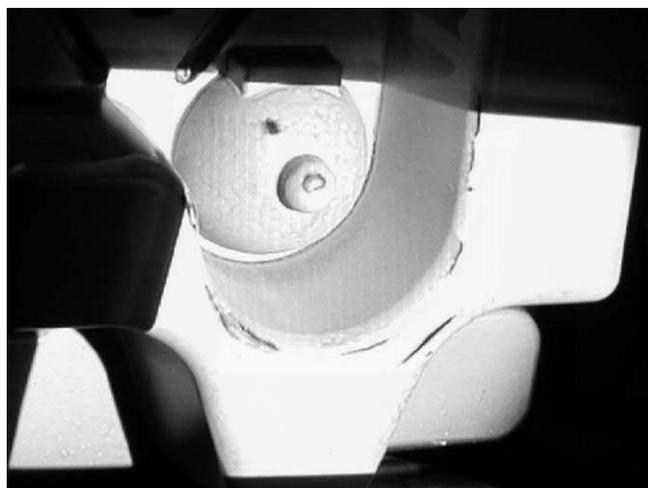


Bild 3: Extrahiertes Videobild.

Bildaufnehmer ersetzt wird. Zusätzlich müssen die über die CCD aufgenommenen Bilder durch eine nachfolgende Elektronik weiterverarbeitet und gespeichert werden (siehe Bild 5). Das letztlich am Computer erhaltene Bild ist durch den Bearbeitungsprozess in vielerlei Hinsicht modifiziert.

Aufgrund der im Vergleich zum Kleinbild geringen CCD-Größe ergeben sich hohe Anforderungen an das optische System. Die geringe Pixelgröße führt zu einer hohen numerischen Apertur bei kurzer Brennweite zur Vermeidung von Beugungsfehlern [24]. Zusätzlich bedingt eine kleine Pixelgröße Probleme hinsichtlich Rauschen. Eine Vergrößerung des CCD-Chips führt zu einer deutlichen Verteuerung und einer Vergrößerung der Kamera und wird nur bei teuren Kameras für den professionellen Einsatz verwendet.

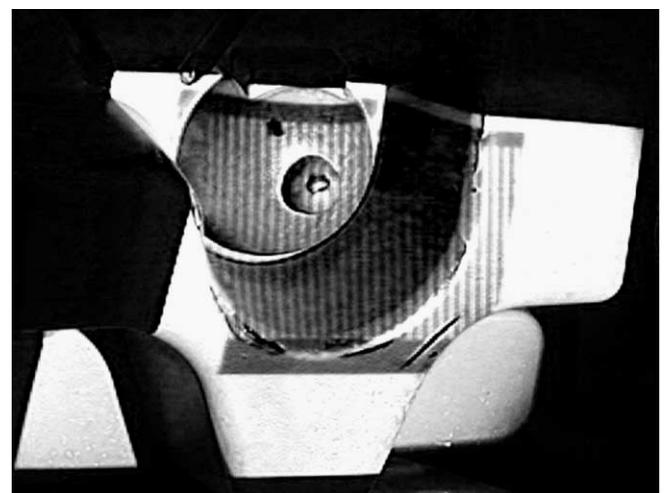


Bild 4: Extrahierter Blaukanal (Streifenbild).

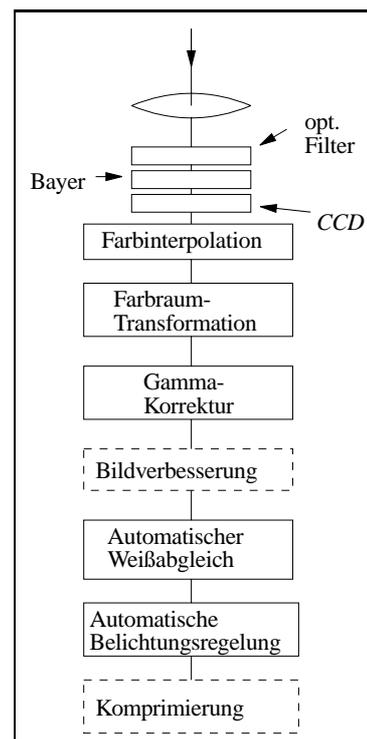


Bild 5: Schematischer Aufbau der Farbverarbeitung in einer Consumer-Digitalkamera.

G	B	G	B	G
R	G	R	G	R
G	B	G	B	G
R	G	R	G	R
G	B	G	B	G

Bild 6: Bayer-Farb-Maske.

Für die farbkodierte Streifenprojektion sind insbesondere die Farbverarbeitung der Kamera (siehe Bild 5) und die Datenkompression von entscheidender Bedeutung.

Da lediglich *ein* CCD-Chip zur Messwerterfassung genutzt wird, muss die Farbinformation räumlich verteilt aufgenommen werden. Zu diesem Zweck wird eine Farbfilter-Maske eingesetzt. Die überwiegende Mehrzahl der Kameras verwendet die so genannte Bayer-Maske, die aus grünen, roten und blauen Farbfilter-Bereichen besteht (Bild 6). Charakteristisch ist bei der Bayer-Maske, dass die Hälfte der Pixel einen grünen Farbfilter aufweist. Da der grüne Spektralbereich dem Bereich der höchsten menschlichen Aug-Empfindlichkeit (gelb-grün) am nächsten kommt und zudem zwischen dem roten und dem blauen Spektralbereich liegt, ist diese Wahl sinnvoll. Für die messtechnische Anwendung ergibt sich daraus, dass die höchste räumliche Auflösung mit dem Grün-Kanal erzielt wird.

Für gebräuchliche Farbfilter ist die Transformationsmatrix der Farbraumtransformation, die von der Kamera automatisch durchgeführt wird, annähernd diagonal, sodass die einzelnen Farbdetektionskanäle (rot, grün und blau) ausreichend getrennt bleiben. Bei einer Beschränkung auf drei Codefarben kann also die Farbraumtransformation der Kamera in erster Näherung vernachlässigt werden. Leichtes Übersprechen der Farbkanäle wird dann durch den Ansatz aus Gl. (2) (s. u.) ausgeglichen. Ganz entsprechend kann man in diesem Fall den Weißabgleich [31] vernachlässigen.

3.1 Farbinterpolation

Um falsche Farbsäume an hellen Kanten zu vermeiden wird vor der eigentlichen Farbfilter-Maske unter Umständen eine optische Tiefpassfilterung („Antialiasing Filter“) durchgeführt. Zusätzlich ergibt die durch diesen Filter erzielte räumliche Mittelung eine Reduzierung von Moiré-Störungen. Zum Einsatz kommen polarisationsoptische und Phasenverzögerungs-Filter [25]. Die Funktion des polarisationsoptischen Filters (Bild 7) beruht auf der Aufspaltung eines Lichtstrahls in doppelbrechendem Material. Durch den Einsatz von zwei doppelbrechenden Medien ergibt sich insgesamt eine 4-fache Aufspaltung. Dementsprechend wird die Information eines Pixels auf insgesamt 4 Pixel verteilt bzw. gemittelt.

Nach der Farbfilterung und Detektion (Umwandlung der Photonen in elektronische Signale) wird die Farbinforma-

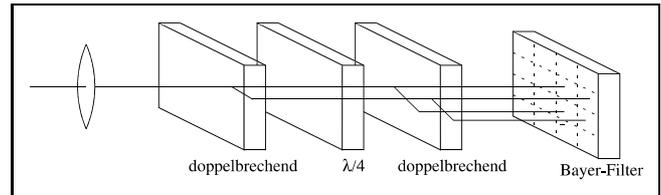


Bild 7: Polarisationsoptischer Tiefpass.

tion an jedem Pixel interpoliert. Da an jedem Pixel lediglich *eine* Farbe detektiert wird, ist eine entsprechende Farbrestitution nötig. Danach erfolgt ein (in der Regel automatischer) Weißabgleich und eine Farbraumtransformation, bei der das durch die Farbfilter gegebene Farbverhalten der Kamera in standardisierte Farbkanäle umgerechnet wird [26]. Abschließend wird eine Gamma-Transformation [28] und unter Umständen eine (verlustbehaftete) Kompression der Daten durchgeführt. Bei einigen Kameras wird eine einfache Form der „Bildverbesserung“, z. B. Kantenverstärkung oder Kontrastanpassung, verwendet [28]. Für die messtechnische Anwendung mit drei Farben sind insbesondere die Farbinterpolation und die Bilddatenkompression problematisch.

Aufgabe der Farbinterpolation ist es, die an einer Pixelposition jeweils fehlenden beiden Farben anhand der lokalen Nachbarschaft zu berechnen. Wegen der hohen Pixelzahl in Verbindung mit der geringen verfügbaren Prozessorleistung von Digitalkameras kommen für diese Interpolation lediglich einfache Verfahren in Frage [27–29]. Untersucht wurden von uns stellvertretend die bilineare Interpolation und die lineare Interpolation mit zusätzlicher Berücksichtigung von Korrelationen. Bei der bilinearen Interpolation wird ein fehlender Grünwert aus den vier Grün-Nachbarn als Mittelwert berechnet. Die fehlenden Blau- und Rot-Anteile werden aus der Mittelung von den zwei Nachbarn der passenden Farbe bestimmt. Bei der Berücksichtigung der Korrelation zwischen den Pixeln werden bei der Mittelung für die Grün-Interpolation die Nachbarn unterschiedlich stark gewichtet. Die Gewichtung orientiert sich dabei an der Korrelation zwischen horizontalen bzw. vertikalen Rot- und Blau-Nachbarschaften [27].

Für die dreidimensionale Vermessung mit dem beschriebenen Verfahren ist die Abweichung bei der Schwerpunktsbestimmung eines Streifens ausschlaggebend für die erzielbare Genauigkeit der Höhenbestimmung (siehe Gl. (1)).

Ein Vergleich zwischen dem Fehler der Positionsbestimmung für rote/blau Pixel und grüne Pixel zeigt, dass der Fehler im roten und blauen Kanal beim Fehlen des vorgeschalteten Tiefpasses dabei um ca. den Faktor zwei größer als für den grünen Kanal ist. Dies ist nicht verwunderlich, da doppelt so viele grüne wie rote bzw. blaue Pixel vorhanden sind.

Für den blauen Kanal liegt der RMS-Fehler (Root-mean-squared) ohne optischen Tiefpass bei 0,03 Pixel und der PV-Fehler (peak-to-valley) bei 1 Pixel. Mit Mittelung reduziert sich der Fehler auf $RMS = 0,18 \cdot 10^{-3}$ Pixel und

$PV = 7,3 \cdot 10^{-3}$ Pixel. Dabei ist das Verhalten relativ unabhängig von der Art der Farbinterpolation.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass bei der Schwerpunktsbestimmung auch mit einfachen Interpolationsverfahren sehr gute Ergebnisse im Subpixelbereich erzielt werden. Der Einsatz eigener, komplizierterer Interpolationsverfahren ist nur bei professionellen Digitalkameras möglich, da nur diese eine Möglichkeit bieten, direkt auf die unverarbeiteten Sensordaten zuzugreifen [30]. Dieser Einsatz lohnt allerdings nicht.

3.2 JPEG-Kompression

Die überwiegende Mehrzahl der am Markt verfügbaren Digitalkameras speichert die aufgenommenen Bilder mittels verlustbehafteter Kompression. In der Regel wird dabei das JPEG-Verfahren (Joint Photographers Expert Group) verwendet. Ein 3,34-MPixel-RGB-Bild hat bei 24 Bit Farbtiefe einen Speicherbedarf von 10 MByte. Typische Farbbilder werden bei maximaler Qualität (JPEG Quality = 100%) auf 1/5 der ursprünglichen Größe reduziert. Bei geringer Qualität (JPEG Quality = 10%) auf bis zu 1/100. Einige Kameras bieten hier unterschiedliche Qualitätsstufen zur Auswahl. Bei solchen extremen Kompressionsraten weisen die Bilder zwar deutliche Kompressionsartefakte auf, sind aber durchaus noch zu gebrauchen.

Das Verhalten der Schwerpunktsdetektion der Streifen wurde für verschiedene JPEG-Qualitätsstufen untersucht. Dabei wurde deutlich, dass wie erwartet bei starker Komprimierung eine Verschlechterung der Schwerpunktsgenauigkeit erfolgt.

Bild 8 zeigt RMS-Fehler für verschiedene Qualitätsstufen der JPEG-Kompression. Dabei entspricht Quality = 10 in etwa einer 70-fachen und Quality = 90 einer 15-fachen Datenreduktion (stark abhängig vom konkreten Bild). Die PV-Fehler sind entsprechend höher (im Bereich 0,5 bis ca. 1 Pixel).

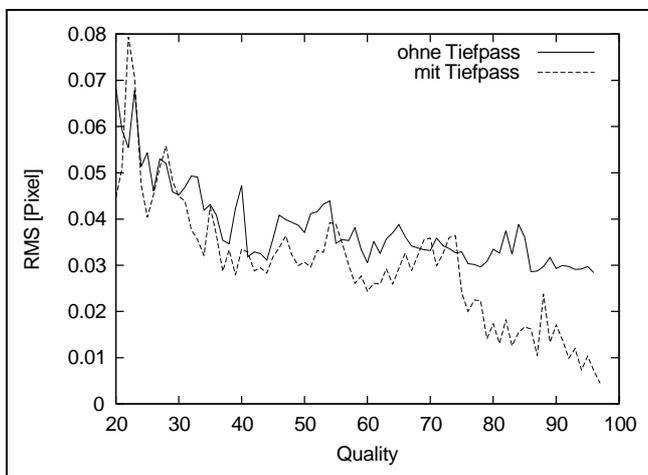


Bild 8: RMS- und PV-Fehler der Schwerpunktsbestimmung eines Streifens bei variabler JPEG-Kompression.

Auffällig hierbei ist, dass die zusätzliche Mittelung durch den vorgeschalteten optischen Tiefpass bei starken Kompressionen nur eine geringe Verbesserung bewirkte. Die im JPEG-Kodierungsverfahren implizit vorhandene Mittelung ist wohl hierfür verantwortlich.

Insgesamt kann gesagt werden, dass bei mittlerer JPEG-Kompression (Quality = 50%, ca. 20...30-fache Datenreduktion) die Genauigkeit der Schwerpunktsbestimmung durch Farbmaske, Interpolation und Kompression lediglich auf ca. 1/20 Pixel RMS begrenzt wird. Dieser Fehler ist im Vergleich zu Fehlerquellen aufgrund der realen Messung (Rauschen, Störbeleuchtung, Vibrationen) zu vernachlässigen, sodass geschlossen werden kann, dass auch preiswerte Consumer-Kameras mit Kompression zur Messung eingesetzt werden können.

4 Ergebnisse

Bei der Auswertung des aufgenommenen Kamerabildes ist zu beachten, dass die Farbfilter bei Projektion und Detektion (Bayer-Maske) teilweise (aus Gründen der möglichst hohen Lichtstärke bei Consumerprodukten) überlappen. Bild 9 zeigt einen Schnitt durch einen Teil eines Kamerabildes bei homogener Grünprojektion mit roten und blauen Streifen. Man sieht deutlich das Übersprechen des blauen Kanals auf den grünen Kanal. Dementsprechend muss insbesondere bei der Extraktion des Videobildes das Übersprechen nachträglich korrigiert werden. Hierzu genügt ein einfaches lineares Modell, bei dem der Grünwert g entsprechend

$$g'(x, y) = g(x, y) + k \cdot b(x, y) \quad (2)$$

modifiziert wird. Alternativ könnte bereits bei der Bildaufnahme das Übersprechen durch den Einsatz eines zusätzlichen Farbfilters (Bandsperr) – bei verminderter Lichtstärke – vermieden werden.

Die Projektion kann sowohl mittels eines lichtmodulatorbasierten Daten-Projektors, als auch mit einem statischen

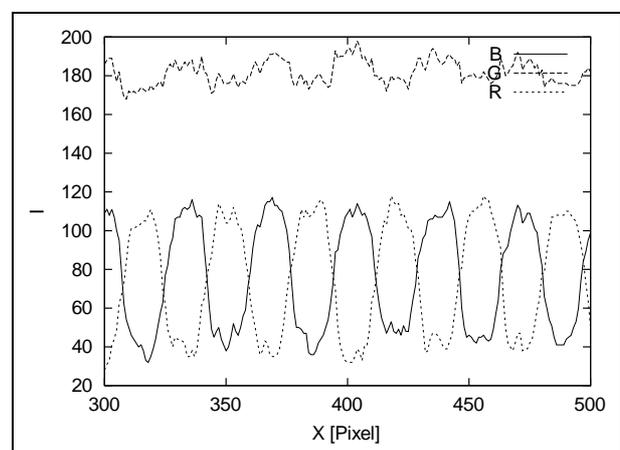


Bild 9: Horizontaler Schnitt durch ein Farb-Videobild.



Dies vorgenommen werden. Dies ist insbesondere für Low-Cost-Lösungen interessant, da neben dem Rechner zur Auswertung lediglich eine Digitalkamera und ein Diaprojektor erforderlich sind.

Der Einsatz eines Projektors hat den Vorteil, dass die Ermittlung der objektangepassten Maske für das Referenzobjekt direkt messend erfolgen kann [32]. Für die Versuche wurde ein 1-Chip-DMD-Projektor (Digital Micromirror Device) vom Typ Astrobeam 540 der Firma Anders & Kern mit einer Auflösung von 1024×768 Pixel eingesetzt. Eine Synchronisation von Projektion und Aufnahme ist dabei nicht zwingend notwendig, da die binäre Streifenprojektion unabhängig vom Verhältnis der einzelnen Farbkanäle robust auswertbar ist.

Bild 2 bis 4 zeigen ein Beispiel einer projizierten Maske, des aus dem Einzelbild extrahierten Videobildes und des entsprechenden Streifenbildes. Die Auswertung des Videobildes wird durch die jeweilige Aufgabenstellung festgelegt (z. B. Barcode-Detektion, Kantendetektion zur Geometrieprüfung). Die Auswertung der binären Streifen erfolgt anhand der Schwerpunktbestimmung für die lokalen Maxima und Minima der Streifen. Dabei wird der Grünkanal mitverwendet, um das Streifenbild von Modulationen aufgrund der lokalen Oberflächencharakteristik (z. B. lokale Verschmutzung) zu befreien. Zur Auswertung werden mittels Schwerpunktbestimmung jeweils zeilenweise die Schwerpunkte der Maxima und Minima bestimmt.

Für stark farbige Objekte (z. B. tiefrote Beschriftung auf dem Objekt) ist die Verwendung von sowohl roten als auch blauen Streifen sinnvoll. Im blauen Kanal können dementsprechend im roten Bereich des Objektes keine Streifen detektiert werden. Eine Auswertung der Form ist dort nicht möglich. In diesem Bereich kann aber der rote Kamerakanal ausgewertet werden, sodass das gesamte Objekt kontrolliert werden kann.

Die laterale Auflösung hängt im Wesentlichen von der Kameraauflösung und von der kameraseitigen Streifenperiode ab. Während bei digitalen Messkameras für kleine Objektdeformationen in etwa die Hälfte der Nyquist-Frequenz, also eine Periode von 4 Pixel, als maximale Streifenfrequenz verwendet werden sollte, empfiehlt es sich mit der Consumer-Digitalkamera eine Streifenperiode von minimal 12 Pixel nicht zu unterschreiten. Grund hierfür ist die aufgrund der Bayer-Maske reduzierte effektive Auflösung pro Farbkanal. Damit ergibt sich für die verwendete 3,3-MPixel-Digitalkamera Olympus Camedia C-3000 eine laterale Auflösung von 1538×340 Pixel für die Formmessung und 1024×768 für das Videobild.

Die Reproduzierbarkeit der Formkontrolle wurde für eine ebene, homogene Fläche (ideales Objekt) gemessen. Dabei wurde durch das Messbild jeweils ein horizontaler Schnitt gelegt. Die Reproduzierbarkeit variiert jeweils mit der konkret verwendeten Projektionsmaske, ist aber in jedem Fall besser als $1/10$ Pixel RMS. Die Höhenaufklärung ergibt sich

aus Gl. (1) zu

$$\Delta z = M \Delta x \frac{0,1}{\tan \alpha}, \quad (3)$$

wenn man von einer Genauigkeit der Streifenpositionsbestimmung von 0,1 Pixel ausgeht. M bezeichnet dabei den Abbildungsmaßstab, α ist der Triangulationswinkel und Δx ist der Pixelabstand der Kamera.

Die Auflösung der Methode wurde gemessen, indem ein Teil einer Szene axial mittels einer Mikromechanik verschoben wurde. Die Speicherung erfolgte mit einer Komprimierung von 1 : 20. Der PV-Fehler war dabei geringer als $1/2$ Pixel. Dies entspricht bei der verwendeten Kamera einer Auflösung von 1 : 4000. Hochgenaue Mehrbildverfahren [33] erreichen in der Regel Auflösungen von 1 : 10 000 bis 1 : 20 000. Dementsprechend sind die erzielten Ergebnisse für ein preiswertes Einzelbildverfahren beachtlich.

5 Zusammenfassung

Die objektangepasste Streifenprojektion ist ein sinnvolles Verfahren zur schnellen Topographiekontrolle, wobei eine konstant hohe laterale Auflösung in Verbindung mit einer guten Höhenaufklärung erzielt werden kann. Dabei ist zusätzlich im Vergleich zu anderen Verfahren eine hohe Robustheit gegenüber Rauschen, Variation der Beleuchtung und Variationen der lokalen Objektreflektivität (Verschmutzung) gegeben.

Die Methode eignet sich insbesondere für Prüfaufgaben, bei denen sowohl eine Oberflächenprüfung (2D) als auch eine Formprüfung (3D) durchgeführt werden soll. Sie bietet trotz geringer Kosten eine vergleichsweise hohe Auflösung im 2D- wie auch im 3D-Bereich.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] E. Horn, N. Kiryati: „Toward optimal structured light patterns“, *Image and Vision Computing* 17, 1999, S. 87–97.
- [2] R. Windecker, H.J. Tiziani: „Topometry of technical and biological objects by fringe projection“, *Applied Optics* 34, 1995, S. 3644–3650.
- [3] K. Leonhardt, U. Droste, H.J. Tiziani: „Microshape and rough-surface analysis by fringe projection“, *Applied Optics* 33, 1994, S. 7477–7488.
- [4] R. Windecker, M. Fleischer, H.J. Tiziani: „Three-dimensional topometry with stereo microscopes“, *Optical Engineering* 36, 1997, S. 3372–3376.
- [5] D.W. Phillion: „General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms“, *Applied Optics* 36, 1997, S. 8098–8115.
- [6] R.E. Brooks, L.O. Heflinger: „Moiré gauging using optical interference patterns“, *Applied Optics* 8, 1969, S. 935–939.
- [7] T. Yatagai, M. Idesawa: „Use of synthetic deformed gratings in moiré topography“, *Optics Communications* 20, 1977, S. 243–24.

- [8] A.W. Lohmann, L. Po-Shiang: „Computer generated moiré“, *Optics Communications* 34, 1980, S. 167–170.
- [9] J. Harthong, H. Annoni: „Mise en évidence des écarts de forme entre une surface matérielle et un modèle de référence par moiré à partir d'un réseau spécifique“, *C.R. Acad. Sci.* 296, 1983, S. 39–41.
- [10] J. Harthong, H. Sahli: „Theory of moiré sensing by means of contour functions“, *Applied Optics* 31, 1992, S. 1436–1443.
- [11] M. Schönleber, H.J. Tiziani: „Fast and flexible shape control with adaptive LCD fringe masks“, *Proc. of the SPIE* 3098, 1997, S. 35–42.
- [12] J. Harthong, A. Becker: „Inverse moiré“, *Proc. of the SPIE* 3098, 1997, S. 2–9.
- [13] H.J. Tiziani, M. Schönleber, T. Haist: „Adaptive Micro and Macro 3D Measurements“, S. 125–132 in „Optical 3D Measurements“, Hrsg. A. Gruen, H. Kahmen, Wichmann Verlag Karlsruhe, 1997.
- [14] M.K. Kalms, W. Osten, W.P. Jüptner: „Inverse projected-fringe technique with automatic pattern adaption using a programmable spatial light modulator“, *Proc. of the SPIE* 3407, 1997, S. 483–489.
- [15] M. Schönleber, E.U. Wagemann, H.J. Tiziani: „Shape deviation measurement with enhanced depth using adapted fringe projection and multiple exposed holograms“, *Proc. ISATA*, 1998.
- [16] E.U. Wagemann, M. Schönleber, H.J. Tiziani: „Grazing holographic projection of object-adapted fringes for shape measurements with enhanced sensitivity“, *Optics Letters* 23, 1998, S. 1621–1623.
- [17] J.L. Mundy, G.B. Porter, T.M. Cipolla: „Non-contact measurement of surface profile“, U.S. patent No. 4.349.277, 1982.
- [18] E. Schubert: „Fast 3D object recognition using multiple color coded illumination“, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (Cat. No.97CB36052)*, 1997, S. 3057–3060.
- [19] G. Häusler, D. Ritter: „Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation“, *Applied Optics* 32, 1993, S. 7164–7169.
- [20] Z.J. Geng: „Color ranging method for high speed low-cost three dimensional surface profile measurement“, U.S. patent No. 5.675.407, 1997.
- [21] R.A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, J. Nisanov: „Structured light using pseudorandom codes“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20, 1998, S. 322–327.
- [22] L. Paul, G. Stanke: „Visuelle Echtzeitvermessung räumlicher Deformationsprozesse durch spektral codierte Szenenbeleuchtung“, *VDI Berichte* 1572, 2000, S. 59–66.
- [23] B.F. Oreb, R.G. Dorsch: „Profilometry by phase-shifted Talbot images“, *Applied Optics* 33, 1994, S. 7955–7962.
- [24] S. Kawamura: „Capturing Images with Digital Still Cameras“, *IEEE Micro* 11/12-1998, 1998, S. 14–19.
- [25] J. Adams, K. Parulski, K. Spaulding: „Color processing in digital cameras“, *IEEE Micro* 11/12-1998, 1998, S. 20–30.
- [26] B. Jähne: „Digitale Bildverarbeitung“, Springer 1997.
- [27] T. Sakamoto, C. Nakanishi, T. Hase: „Software pixel interpolation for digital still cameras suitable for a 32 Bit MCU“, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 44, 1998, S. 1342–1352.
- [28] Y.H. Jung, J.S. Kim, B.S. Hur, M.G. Kang: „Design of real-time image enhancement preprocessor for CMOS image sensor“, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 46, 2000, S. 68–75.
- [29] Y.H. Kim, K.S. Kim, B.D. Nam: „A new perceptual approach for CCD matrix calculation“, *Proc. of the SPIE* 3644, 1999, S. 586–597.
- [30] A. Stein, R. Seetzen, C. Meyer: „Drei neue Digital-Spiegelreflexkameras von Canon, Fuji und Olympus“, *c't Magazin für Computer Technik* 25/2000, 2000, S. 218.
- [31] Y.H. Liu, W.H. Chan, Y.Q. Chen: „Automatic white balance for digital still camera“, *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 41, 1995, S. 460–466.
- [32] T. Haist, E.U. Wagemann, H.J. Tiziani: „Single-frame evaluation of object-adapted fringes“, *Proc. SPIE Vol. 3823*, 1999, S. 74–83.
- [33] R.M. Kowarschik, P. Kuehmstedt, J. Gerber, W. Schreiber, G. Notni: „Adaptive optical 3-D-measurement with structured light“, *Optical Engineering* 39, 2000, S. 150–158.

Dipl.-Phys. Tobias Haist, Prof. Dr. Hans J. Tiziani, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart, E-Mail: haist@ito.uni-stuttgart.de