Schnelle 3-D-Kamera mit adaptierbaren, hochauflösenden Markierungscodes

R. Malz, H. J. Tiziani

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 7000 Stuttgart 80

1 Einleitung

Hohe funktionale Flexibilität und kurze Reaktionszeiten sind wichtige Eigenschaften moderner industrieller Produktionseinrichtungen, um der wachsenden Variantenvielfalt und den kurzen Taktzeiten gerecht werden zu können. Die flexible Automatisierung braucht daher nicht nur programmierbare Aktoren (Roboter statt spezieller Handhabungseinrichtungen) und Steuerungseinrichtungen (Rechner statt festverdrahteter Logik), sondern auch Sensoren mit programmierbaren Eigenschaften zur Anpassung an unterschiedliche Arbeitsbedingungen und Aufgaben.

Insbesondere für die optische Erkennung und Vermessung von Objekten mit wechselnden Form-, Farb- und Reflexionseigenschaften werden geeignete optische 3-D-Sensoren benötigt. Das hier vorgestellte System wurde unter dem Gesichtspunkt hoher Flexibilität entwickelt: mit einem frei programmierbaren Laser-Markierungsprojektor können beliebige Codes erzeugt werden, die eine schnelle Adaption an das Meßobjekt ermöglichen.

Durch die Entwicklung effizienter Markierungscodes konnte die Länge der erforderlichen Bildsequenzen für eine gegebene Auflösung und Störsicherheit gegenüber herkömmlichen Verfahren wesentlich reduziert werden. Dies wird in Zukunft immer wichtiger, da bei der Verwendung schneller Bildverarbeitungshardware nicht mehr die Auswert-, sondern die Aufnahmezeit der erforderlichen Videodaten zum zeitbestimmenden Faktor wird, der die Verweildauer der Objekte bestimmt oder die Reaktionszeit der Roboter begrenzt.

Mit dem derzeitigen System können Objekte im Submeterbereich mit Submillimetrauflösung vermessen werden. Durch die effiziente Codierung konnte die Aufnahmezeit für ein vollständiges 3-D-Koordinatenbild mit bis zu 512×512 absoluten Distanzmeßwerten auf ca. 240 bis 320 ms reduziert werden. Neben Standardkameras mit 25 Hz Bildfrequenz können auch hochauflösende oder schnelle Matrixkameras eingesetzt werden.

2 Triangulationsverfahren

Die Erkennung, Prüfung oder Vermessung von Objekten wird im Rahmen der industriellen Automatisierung zunehmend auch mit 3-D-bildgebenden Sensoren realisiert. Ergänzend zu den scannenden Punkt-triangulations- und Lichtschnittverfahren werden strukturierte und codierte Beleuchtungsverfahren eingesetzt, die wegen ihres flächenhaften Meßprinzips höhere Meßraten erlauben. Wie beim passiven Stereosehen mit zwei Kameras wird bei den strukturierten Beleuchtungsverfahren das Prinzip der geometrischen Triangulation genutzt, nur daß hier eine Kamera durch einen Markierungsprojektor ersetzt wird. Da bei der monokularen Abbildung eines Objektes die Bildkoordinaten (x und y) bereits zwei der drei Positionsfreiheitsgrade eines Oberflächenpunktes festlegen, genügt zur Bestimmung der Distanz bzw. Topografie $z = f(x, y)$ eine eindimensionale Markierungsfunktion. Dazu erzeugt der Projektor gewissermaßen einen diskreten oder kontinuierlichen Stapel von Lichtschnittebenen. Durch Streuung auf der Objektoberfläche können diese im Bild bzw. in der Bildsequenz identifiziert und in Höhen- bzw. Distanzwerte umgerechnet werden kann. Eine suchende Korrespondenzanalyse kann daher entfallen.

3 Probleme der optischen Markierung

Damit eine projizierte Markierung erkannt werden kann, muß die Oberfläche genügend Projektorlicht in die Kameralupille streuen. Matte Oberflächen (Bild 1) und stetige Formen sind im industriellen Bereich eher die Ausnahme. Metall- und Kunststoffobjekte liefern meist optische Signale mit sehr großen Signalschwankungen. Das hat zur Folge, daß das Nutzsignal häufig bei niedrigen Grauwerten liegt, um zu starke Übersteuerungen zu vermeiden (Bild 2).

Bild 1 : Histogramm einer mattweißen Oberfläche

Bild 2 : Histogramm eines Metallobjektes

Zusätzliches Umgebungslicht, daß auch bei ausgeschaltetem Projektor bereits einen Grauwert liefert, schränkt die verfügbare Signalmodulation weiter ein (Bild 2 links). Ein weiteres Problem ist die prinzipielle Untergrenze der optischen Auflösung bei der Abbildung räumlich ausgedehnter Objekte. Selbst bei optimalem Kompromiß zwischen Beugungsunschärfe (bei kleinerer Blende) und geometrischer Unschärfe (bei größerer Blende) läßt sich eine Überlappung mehrerer Codeworte nicht vermeiden.

Bild 3 : Umgebungslicht, unbekannte lokale Reflektivität (links) und Ortsfrequenztransformation (rechts) durch unterschiedliche Neigungen der Objektoberfläche beeinträchtigen die optische Übertragung der Markierungsinformation.

4 Strukturierte und codierte Beleuchtungen

Bei den sogenannten statischen Verfahren werden zur Markierung werte- und ortskontinuierliche Moiré-, Gitter- oder Farbstrukturen verwendet. Diese Einzelbildverfahren lassen bei Kurzzeitbelichtung auch bewegte Objekte zu, allerdings wird dieser Vorteil durch eine Reihe von Nachteilen erkauft: es können nur gleichmäßig reflektierende und stetige Oberflächen vermessen werden. Außerdem ist die effektive Zahl von Meßpunkten weitaus geringer als die Zahl der Kamerapixel.

Dynamische Bildsequenzverfahren setzen dagegen ruhende Objekte voraus, sind aber für ein weit größeres Objektspektrum geeignet. Da die Objektdistanz hier als zeitliche Grauwertsequenz codiert ist, liefert prinzipiell jede Bildkoordinate einen Meßwert. Für die Eigenschaft dynamischer Verfahren ist allerdings die Art der Codierung von grundlegender Bedeutung. Verwendet werden bisher vor allem

- periodische Moiré- oder Gitterstrukturen mit mehrfacher Phasenschiebung [2,3,5,9],
- Moiré- oder Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Periodenlängen und mehrfacher Phasenschiebung [2,3,5,9] und
- binäre, ortsdiskrete Graycodemuster [1,4].

Während die zuerst genannten grauwert- und ortskontinuierlichen Analogverfahren nur bei gleichmäßig reflektierenden Oberflächen sinnvoll für eine genaue Vermessung eingesetzt werden können, eignen sich die binärcodierten Digitalverfahren vorwiegend für die Erkennung komplexer Objekte mit begrenzter Auflösung. Mit keinem der genannten Verfahren wird die in [10] hergeleitete relative Grenzaufklärung für Markierungen auch nur annähernd erreicht.

5 Hybride Markierungscodes

Das hier vorgestellte Meßsystem verwendet die in [6,7,10] entwickelten hybriden Markierungscodes, die die Vorteile analoger und digitaler Strukturen vereinigen (Bild 4). Sie ermöglichen eine höhere Relativauflösung in kürzerer Meßzeit oder bei niedrigeren Störabständen, so daß sich auch problematische Oberflächen unterschiedlicher Reflexion und Form schnell und genau vermessen lassen.

Bild 4 : Beispiel für einen binären MZXpX-Hybridcode mit 8 Stellen

Bild 5 zeigt einen Vergleich verschiedener Markierungsverfahren mit jeweils 8 Stellen (8 Bilder). Nach oben ist die Zahl der Codeworte (Zahl der unterscheidbaren Distanzwerte bzw. relative Distanzauflösung) aufgetragen, nach rechts die für die Codierung frei verfügbare Dynamik (Kamera- minus Objektdynamik), gemessen in unterscheidbaren Grauwertklassen. Der MZXpX-Code erreicht nahezu die theoretische Grenze $Z_{\max}$.

Bild 5 : Vergleich der Codierungseffizienz verschiedener 8-stelliger Markierungsfunktionen

6 Programmierbare Projektoren und automatische Codeoptimierung

Die in der Praxis verwendeten Verfahren orientieren sich meist an einem bestimmten physikalisch-optischen Erzeugungsprinzip periodischer Lichtstrukturen, die dann meist nicht grundsätzlich, aber im günstigen Fall in Frequenz und Phase veränderbar sind. Interferometrische Projektionsverfahren erzeugen beispielsweise Sinusstreifen. Moiré mit Rechteckgittern liefert Dreieckstreifen. In beiden Fällen werden die signaltheoretischen Möglichkeiten nicht ausgenutzt.

Um die Leistungsfähigkeit variabler Codierungen ausnutzen zu können, sollten die Projektoren beliebig programmierbar sein und quasianaloge Eigenschaften aufweisen. Das heißt, daß die maximale Orts- und Intensitätsauflösung im Vergleich zur Orts- und Wertequantisierung einer Matrixkamera bzw. eines digitalen Bildspeichers so hoch sein sollte, daß auch Signale gesendet werden können, die von optisch erzeugten Analogsignalen nicht zu unterscheiden sind.

Bild 6 zeigt die Skizze eines Laserprojektor-Prototyps mit dynamischer Fokussierung und variablem Scan-Bereich für die Projektion beliebiger Analog-, Digital- und Hybridcodes. Die Projektion erfolgt mit einer Frequenz von 50 Hz. Damit ist eine zeitlich lückenlose Bildaufnahme möglich.

Bild 6 : Erster Prototyp des programmierbaren Laserprojektors

Die geforderte Flexibilität des Codierungssystems für wechselnde Anforderungen setzt eine automatische Optimierung voraus. Dazu wird eine Analyse der Systemeigenschaften, der optischen und topologischen Eigenschaften von Meßobjekt und Umgebung durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse liefern die Kriterien für eine automatische Generierung geeigneter Codes.

7 Ergebnisse und Zusammenfassung

- Optische Markierungen für das triangulationsbasierte 3-D-Maschinensehen sollten im Hinblick auf einen flexiblen Einsatz eindeutig decodierbar, effizient und variabel sein.
- Hybride Codes vereinigen die Genauigkeit analoger Markierungsfunktionen mit der Robustheit digitaler Codes. Maximale Meßgeschwindigkeit wird erzielt, indem die Codes die verfügbare Qualität des Videosignals ausnutzen.
- Eine aktive 3-D-Kamera, bestehend aus Laser-Codeprojektor, CCD-Sensor und Codierungssystem kann sowohl für Messungen im Submillimeter-Bereich, als auch für die Objekterkennung im Meterbereich eingesetzt werden.
- Durch automatische Analyse des Nachrichtenkanals "Projektor-Objekt-Kamera-Bildspeicher" und variable Codegenerierung kann die jeweils verfügbare Kanalkapazität ausgenutzt werden, um die Übertragungszeit der Markierungsinformation zu minimieren.

Das vorgestellte Codierungssystem hat unter diesen Gesichtspunkten günstige Eigenschaften:

- Unempfindlichkeit gegenüber Fremdlichteinflüssen und Lichtreflexen; im Extremfall durch binäre Codeanteile. Einsetzbar bei Objekten mit komplizierter Topologie und variierenden Reflexionseigenschaften (3-D-Robot Vision).
- Genauigkeit durch analoge Codeanteile. Die erreichbare Auflösung liegt im Submillimeterbereich (Qualitätsprüfung in Fertigung und Montage).
- Geschwindigkeit durch effiziente Codes. Die Erzeugung und Aufnahme der optischen Information zur Berechnung von rund 250 000 3-D-Koordinatenpunkten erfolgt je nach Bedingungen und Anforderungen in 40 – 320 Millisekunden. Die weitere Verarbeitung hängt von der Rechnerstruktur ab und kann bei Einsatz modernster Bildverarbeitungshardware vernachlässigt werden.
- Wählbare Prioritäten für maximale Geschwindigkeit, maximale Genauigkeit oder maximale Störsicherheit. Die jeweils zweit- und drittrangigen Eigenschaften werden automatisch stärker in Anspruch genommen.
- Automatische Anpassung des Sensors an System, Objekt und optische Umgebungsbedingungen, d.h. der verfügbare Signal-Rausch-Abstand wird durch die Codierung ausgeschöpft.

Am Beispiel eines typischen Industrieobjektes, einem quaderförmigen Pneumatik-Teil (Länge 64 mm) mit dem ungünstigen Grauwerthistogramm nach Bild 2, wird die Leistungsfähigkeit einer solchen Anpassung demonstriert. Bild 7 zeigt das mit einem 7-stelligen MZXpX-Code in 280 ms aufgenommene 3-D-Bild. Mit einem Verfahren der klassischen Streifenprojektion könnte das Objekt unter gleichen Zeit- und Auflösungsbedingungen nur an den wenigen Einzelpunkten vermessen werden, die eine hohe Modulation aufweisen.

Bild 7 : Konturliniendarstellung eines Aluminium-Druckguß-Gehäuses mit stark unterschiedlichen Reflexionseigenschaften

8 Literatur:

- [1] Wahl, F.: A Coded Light Approach for Depth Map Acquisition. Mustererkennung 1986. Informatik-Fachberichte 125. Springer-Verlag (1986).
- [2] Tiziani, H. J.: Rechnerunterstützte Laser-Meßtechnik. Technisches Messen tm 54 (1987).
- [3] Zumbrunn, R.: Automatic Fast Shape Determination of Diffuse Reflecting Objects at Close Range, by Means of Structured Light and Digital Phase Measurement. ISPRS Intercommission Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, June 2-4 (1987).
- [4] Sato, K.; Inokuchi, S.: Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask. Proc. 1st Intern. Conf. on Computer Vision, London (1987).
- [5] Tiziani, H.J.: Optische Abstandsmessung mit hoher örtlicher Auflösung. Microwaves and Optonics '89, Conf. Proceedings. Network GmbH (1989).
- [6] Malz, R.: Adaptive Light Encoding for 3-D-Sensing with Maximum Measurement Efficiency. 11. DAGM-Symposium, Hamburg. Informatik-Fachberichte, Springer (1989).
- [7] Malz, R.: Methoden der flexiblen Objektbeleuchtung beim 3-D-Maschinensehen. In: Ahlers, R.-J. (ed.): Bildverarbeitung – Forschen, Entwickeln, Anwenden. Technische Akademie Esslingen, Eigenverlag (1989).
- [8] Malz, R.; Queisser, A.: Kantenverfolgung in topografischen Höhenkarten mit Ringoperatoren. 12. DAGM-Symposium, Aalen, Informatik-Fachberichte 254, Springer (1990), S. 579-584.
- [9] Tiziani, H. J.: Optische Verfahren zur Abstands- und Topografiebestimmung. Informationstechnik it 33, S. 5-14, Oldenbourg (1991).
- [10] Malz, R.: Codierte Lichtstrukturen für 3-D-Meßtechnik und Inspektion. Dissertation in Vorbereitung, Stuttgart (1991).