

Absolute Moirémeßtechnik zur Formfassung nicht notwendigerweise stetiger Oberflächen

H. Wolf

ABW GmbH, Frickenhausen

Zusammenfassung

Der Codierte Lichtansatz gehört als optisches Meßverfahren zu den aktiven Triangulationstechniken und bietet dort die Möglichkeit zur schnellen und robusten Aufnahme flächendeckender 3D-Koordinaten /Stru_92/, /Wahl_86/. In Kombination mit dem Phasenshiftverfahren wird eine Genauigkeitssteigerung der Höhenmessung im Subpixelbereich erzielt. Bei hoher Linienzahl des Projektionsgitters ergibt sich durch Interferenz mit der Zeilenstruktur der Videokamera Moirélinien. Mit dem Linienprojektor LCD-1280 kann nun die Moirémeßtechnik zur absoluten 3D-Messung realisiert werden.

Triangulationsverfahren

Bei dem aktiven Triangulationsverfahren stellen ein Projektor, ein durch den projizierten Lichtstrahl beleuchteter Oberflächenpunkt des Meßobjekts und eine Kamera ein Dreieck dar. Projektor und Kamera bilden die Basis des Dreiecks. Kennt man die Basislänge und die Winkel zwischen den Lichtstrahlen und der Basis, kann man den Ort des Schnittpunktes in Bezug zur Basis berechnen [Abb. 1].

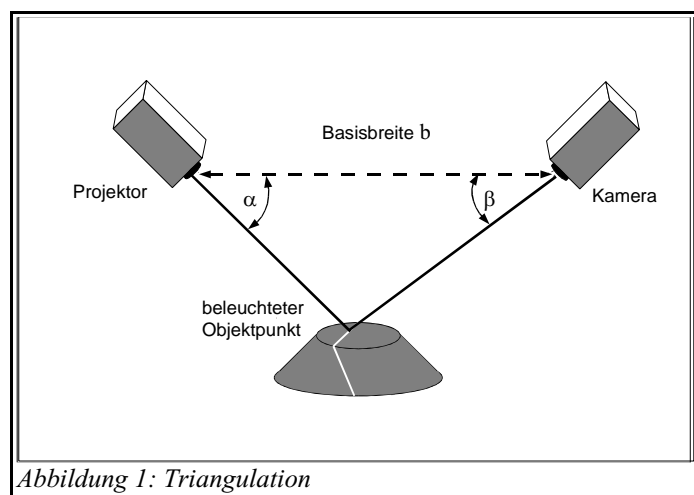


Abbildung 1: Triangulation

Lichtschnittverfahren

Beim Lichtschnittverfahren wird ein ebenes Lichtbündel auf das zu messende Objekt projiziert. Dieses Lichtbündel erzeugt eine helle Linie auf dem Objekt. Aus der Blickrichtung des Projektors ist diese Linie exakt gerade. Aus der seitlichen Sicht der Video-Kamera sieht sie man nach dem Prinzip des stereoskopischen Sehens durch die Objektgeometrie deformiert. Die Abweichung von der Geradheit im Kamerabild ist ein Maß für die Objekthöhe [Abb. 2].

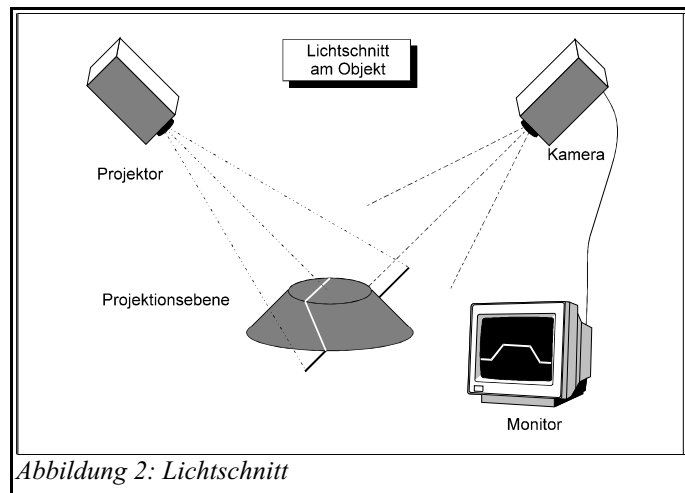


Abbildung 2: Lichtschnitt

Codierter Lichtansatz

Projiziert man gleichzeitig viele parallele Linien, also ein Liniengitter, so hat man bei herkömmlichen Verfahren das Zuordnungsproblem der hellen Linien im Bild zu der richtigen Projektionslinie [Abb. 6]. Das Verfahren des Codierten Lichtansatzes behebt diese Vieldeutigkeit durch die Aufnahme einer Sequenz von Bildern. Bei jedem Bild werden die Projektionslinien individuell hell oder dunkel geschaltet, so daß die Hell-Dunkel-Folge für jede Linie eindeutig ist. Betrachtet man ein einzelnes Bildelement in der Kamera, so "sieht" dieses Bildelement eine eindeutige Hell-Dunkel-Folge, die sich über eine Tabelle eindeutig genau derjenigen Projektionslinie zuordnen läßt, die das Oberflächenelement beleuchtete. LCD-Linienprojektoren bieten die Möglichkeit, die Projektionslinien individuell hell und dunkel zu schalten. Damit wird der 'Codierte Lichtansatz' in einer industrietauglichen robusten Form ermöglicht und ein absolutes Meßverfahren mit einem Liniengitter realisiert [Abb. 3].

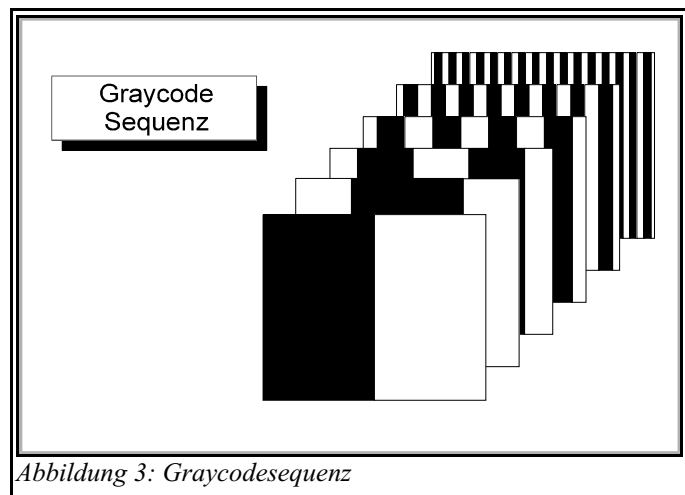


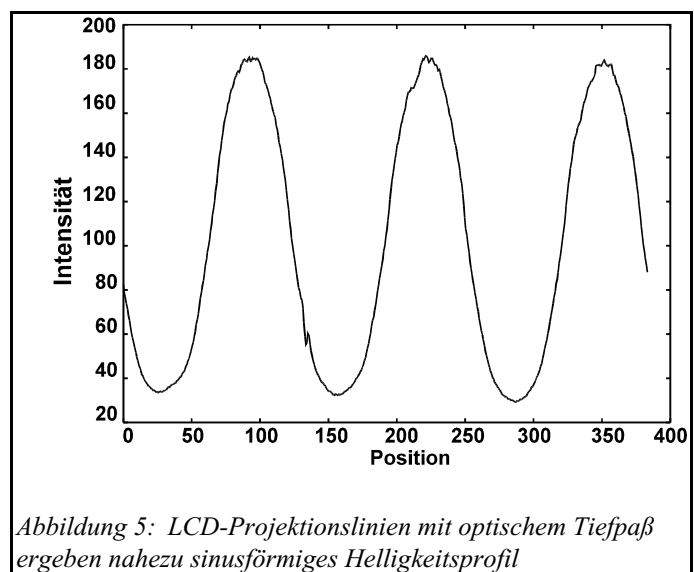
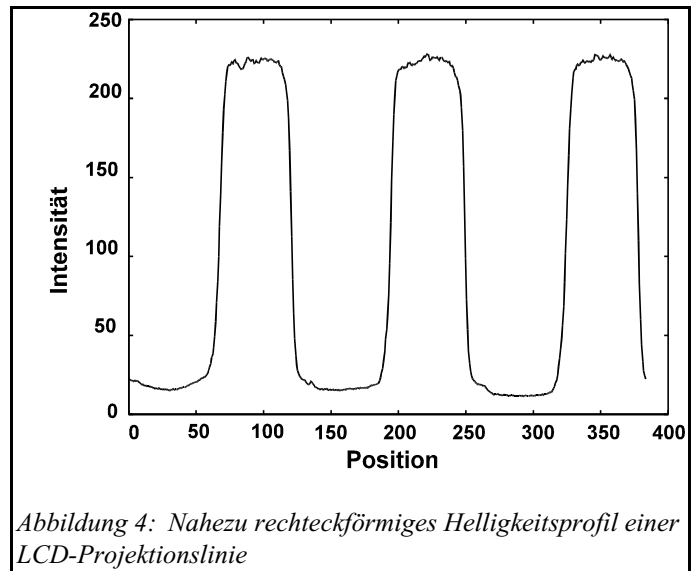
Abbildung 3: Graycodesequenz

Phasenshiftverfahren

Bei kleinen Höhenänderungen verschiebt sich eine Hell-Dunkel-Kante im Kamerabild nur um Bruchteile einer Gitterperiode. Weist das Projektionsgitter eine sinusförmige Helligkeitsmodulation auf, so signalisiert ein Bildelement in der Kamera eine sinusförmige Änderung. Verschiebt man das Projektionsgitter im Projektor um eine Viertelperiode, so wird das Bildelement nun eine cosinusförmige Abhängigkeit von der Objekthöhe ausgeben. Der Quotient aus beiden Signalen entspricht somit dem Tangens der durch die Höhenänderung bewirkten Verschiebung /Schw_93/. Mit einer Tabellenoperation kann daraus der Arkustangens gebildet werden. Dieser stellt als Winkel-bzw. Phaseninformation die Verschiebung in Bruchteilen der Gitterperiode dar.

Mit schaltbaren LCD-Projektoren kann die Verschiebung des Projektionsgitters um eine oder mehrere Linienbreiten ohne mechanische Bewegung programmiert werden.

In /Stru_92/, wird von Meßwertabweichungen der einzelnen Bildelemente in der Höhe von 1/5000 bezogen auf die Bildfeldbreite berichtet. Bei dem Phasenshiftverfahren wird von einer sinusförmigen Helligkeitsmodulation ausgegangen. Mit Flüssigkristallzellen (LCD) lassen sich nur rechteckförmige Helligkeitsprofile erzielen (Abb. 4). Die Sinusform ließ sich bisher nur durch eine treppenförmige Aneinanderreihung mehrerer entsprechend heller LCD-Projektionslinien oder durch Defokussierung des Projektors annähern. Bei gegebener Linienbreite der Einzellinien führt die treppenförmige Approximierung zwangsweise zu breiten Gitterperioden. Für eine vorgegebene absolute Höhenauflösung muß dann die Phasenmessung innerhalb einer Periode entsprechend genauer sein. Bei der Annäherung der sinusförmigen Modulation durch Defokussierung wird der nutzbare Tiefenschärfbereich auf etwa ein Drittel reduziert. Diese Nachteile werden mit einem optischen Tiefpaß von ABW umgangen. Die projizierten Linien der Flüssigkristallzellen weisen mit dieser Option einen sinusförmigen Helligkeitsmodulation auf (Abb. 5).



Absolut messende Moirétechnik

Durch die große Anzahl schaltbarer Projektionslinien (bis zu 1280 Linien) in den LCD-Projektoren können herkömmliche Bildverarbeitungssysteme zu 3D-Bildverarbeitungssystemen mit absolut messender Moirétechnik ohne bewegte optische Komponenten aufgerüstet werden.

Die Moirétechnik war bisher aufgrund der periodischen Struktur der Moirélinien auf die vergleichende Messung von leichten Deformationen oder auf die Messung sanft gekrümmter Objekte beschränkt. Größere Deformationen mußten durch Abzählen

(dekodieren) der Moirélinien ermittelt werden. Man spricht hier von einem zyklisch absoluten Meßverfahren. Unlösbare Probleme ergaben sich naturgemäß an Höhengsprüngen der Objekte und bei der absoluten Bestimmung der Anfangshöhe.

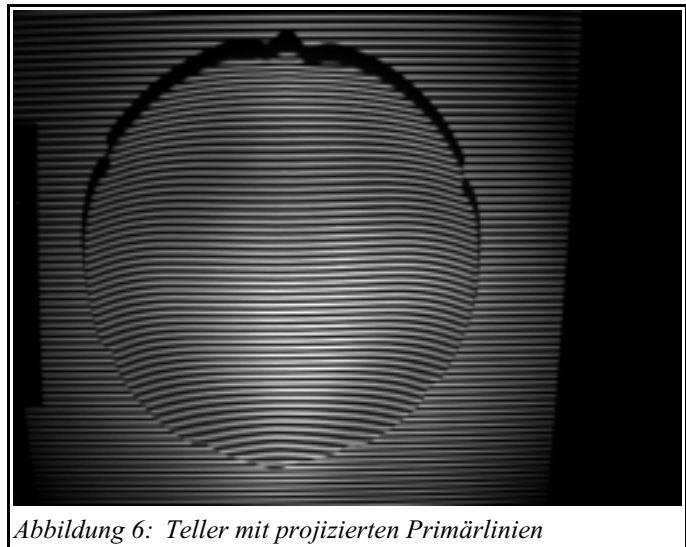


Abbildung 6: Teller mit projizierten Primärlinien

Mit den in der Helligkeit schaltbaren Linien der LCD-Projektoren gehören diese Probleme der Vergangenheit an. Alle sichtbaren Punkte können nun unabhängig von irgendwelchen Nachbarschaftsbeziehungen direkt in der Höhe gemessen werden.

Alternating Moiré

Aus den 1280 Linien im Linienprojektor werden je zwei benachbarte Linien hell bzw. dunkel geschaltet. Man erhält somit optisch 640 Linien, die bei entsprechendem Bildausschnitt mit den ca. 570 Zeilen käuflicher Videokameras interferieren.

Wenn man Projektor und Kamera wie bei dem Stereosehen aus etwas unterschiedlichen Richtungen auf das Objekt richtet, geben die Interferenzstreifen oder Moirélinien Aufschluß über die Objektgeometrie. Mit dem

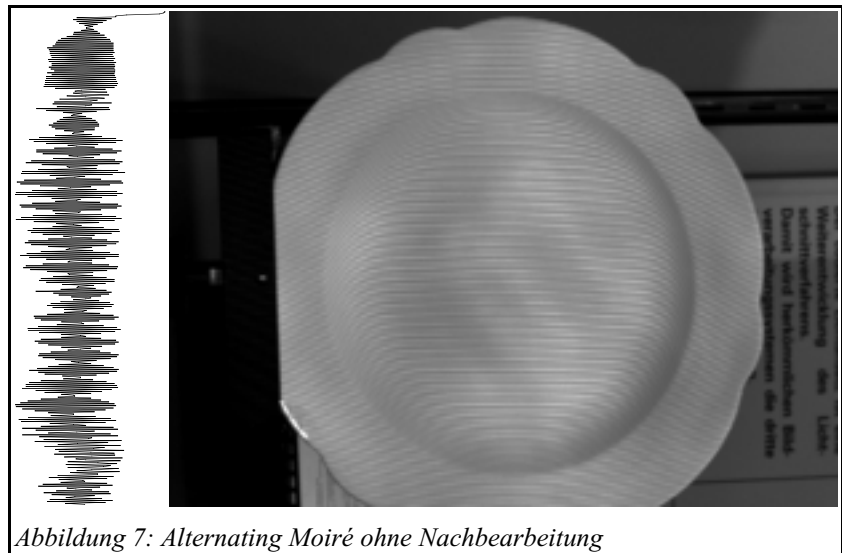


Abbildung 7: Alternating Moiré ohne Nachbearbeitung

Phasenshiftverfahren kann die Höhenauswertung in Subpixelgenauigkeit erfolgen.

Beim klassischen Projektionsmoiré benötigt man doppelt so viele Projektionslinien da hier jede Kamerazeile zusammen mit dem unempfindlichen Zwischenraum zwischen den Zeilen als volle Periode wirkt. Die klassische Moirétechnik kann mit bei Interline-Kameras älterer Bauart durchgeführt werden, da hier die aktive Fläche der Pixel etwa nur die Hälfte der Zeilenperiode

beträgt /Lenz_89/. Bei modernen Kameras ist ein Mikrolinsenarray direkt vor der lichtempfindlichen Schicht des CCD-Imagers angeordnet, das nahezu alles Licht auf die aktiven Flächen der Pixel sammelt. Es gibt hier nahezu keine unempfindlichen Zwischenräume mehr. Diese Kameras eignen sich somit für die klassische Moirétechnik nicht sehr gut.

Bei dem hier verwendeten "Alternating Moiré" interferieren die Projektionslinien mit geraden Liniennummern

mit den Pixeln der geraden Kamerazeilen und ebenso die ungeraden Projektionslinien mit den ungeraden Kamerazeilen. Bei der herkömmlichen Videotechnik mit der Interlaced Darstellung flimmern die Bilder dann extrem stark [Abb. 7]. Man sieht in dieser Aufnahme

deutlich die nahezu komplementären Grauwerte aufeinander folgender Bildzeilen. Ein Profil des Grauwertverlaufes in der Bildmitte (Bildspalte 256) ist in Abb. 8 dargestellt. Der optische Eindruck der Moirélinien ist damit zunächst recht schlecht, die Moirélinien müssen durch geeignete Maßnahmen herausgearbeitet werden.

- werden die Differenzen aufeinanderfolgender Zeilen jeweils invertiert, bilden sich die Moiréstrukturen voll aus (Abb. 8). Das zugehörige Helligkeitsprofil der Bildspalte 256 ist in Abb. 10 dargestellt.
- In einer weiteren Bearbeitungsstufe können die Moirélinien von der Textur des Grauwertbildes dadurch hervorgehoben werden, daß man zunächst das Originalmuster projiziert, dieses Bild speichert, anschließend das inverse Helligkeitsmuster projiziert und dieses Bild vom ersten subtrahiert. In diesem Differenzbild werden Gleichlichtanteile des Umgebungslichtes unterdrückt.

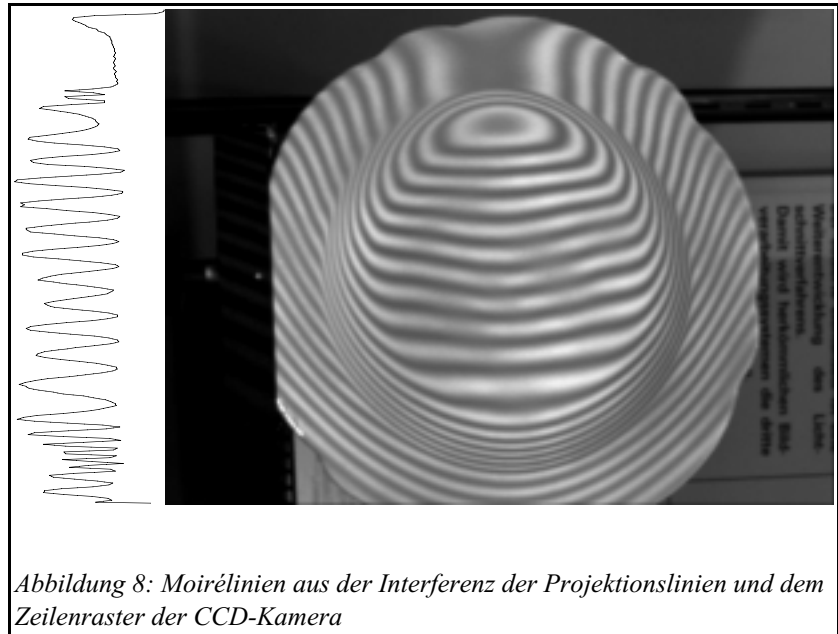


Abbildung 8: Moirélinien aus der Interferenz der Projektionslinien und dem Zeilenraster der CCD-Kamera

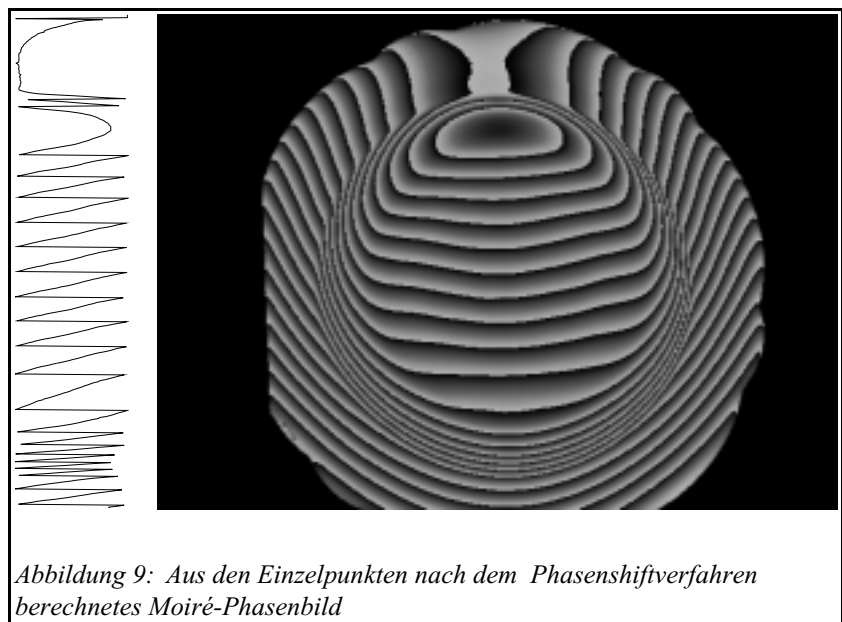


Abbildung 9: Aus den Einzelpunkten nach dem Phasenshiftverfahren berechnetes Moiré-Phasenbild

Vorteile des Meßverfahrens

Die Programmierbarkeit der Linienhelligkeit im Linienprojektor LCD-1280 bietet nun zwei entscheidende Vorteile:

1. Zur subpixelgenauen Auswertung der Linien werden nach dem bekannten Phasenshiftverfahren aus insgesamt vier um je eine halbe (optische) Linienbreite verschobene Gitterprojektionen das sogenannte Phasenbild erzeugt (Abb. 10). Diese vier Projektionsgitter lassen sich im LCD-1280 durch die elektrische Programmierung darstellen.
2. Zur absoluten Messung wird zu jedem Bildpunkt der Videokamera die Liniennummer der zugeordneten Projektionslinie benötigt. Dies läßt sich mit demselben Liniengitter nach dem ebenfalls bereits bekannten 'Codierten Lichtansatz' erzielen. Hierzu werden in zusätzlichen Aufnahmen alle Linien mit ihrem eindeutigen Binärcode auf das Objekt projiziert. Durch Binarisierung der Aufnahmen wird dieser Code nun bitweise in jedem Pixel bzw. der zugehörigen Speicherzelle (Bit-Plane-Stack) im Bildspeicher des Bildverarbeitungssystems eingetragen. Nach Abschluß dieser Aufnahmesequenz steht im Bildspeicher jedes Kamerapixels der Code der zugeordneten Projektionslinie. Somit ist wie gefordert zu jedem Pixel die Nummer der zugeordneten Projektionslinie bekannt.

Vorteile des Verfahrens für den Anwender

- unabhängige Messung aller Einzelbildelemente: Jeder sichtbar ausgeleuchtete Oberflächenpunkt wird unabhängig von irgendwelchen Nachbarschaftsbeziehungen ausgewertet. Oberflächen wie sie in der Technik und in der Natur vorkommen mit Höhengsprüngen etc. lassen sich problemlos messen. Das Nachzählen der Linien (Decodieren) entfällt.
- absolute Messung: Die Meßwerte aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen lassen sich in ein gemeinsames Koordinatensystem transformieren und als Ganzes auswerten.
- maximale Auflösung: Durch die extrem kurze Periode entsprechend dem Pixelabstand der Kamera ergibt sich bei gleicher Phasenmeßgenauigkeit eine entsprechend hohe absolute Auflösung. Die Gitterperiode ist so klein, daß das bekannte Shannon'sche Abtasttheorem gerade erreicht wird. (Nur dadurch entstehen ja die Moirélinien.)
- hohe Meßgeschwindigkeit: Mit dem normalen Lichtschnittverfahren müßte man für die gleiche Auflösung 1280 getrennte Lichtschnitte, d.h. 1280 Videoaufnahmen machen. Bei der in Europa üblichen CCIR Videonorm mit 25 Bildern pro Sekunde würde dies über 50 Sekunden dauern selbst wenn die Bildverarbeitungshardware alle notwendigen Operationen in Video-Echtzeit ausführen könnte.
- Möglichkeit zur Filterung mit dem "alternating Moiré-Verfahren" bereits im Moiré-Phasenbild bereits mit halber Projektionslinienzahl im Vergleich zum klassischen Projektionsmoiré.

Mit dem 'Codierten Lichtansatz' in Kombination mit dem Phasenshiftverfahren werden je nach Auswertevariante 16 bis max. 30 Aufnahmen benötigt. Dies ist eine bis zu 80-fache Beschleunigung!

Anwendungen

Qualitätskontrolle in der Fertigung, Modellaufnahme, Gewinnung von CAD-Daten aus Prototypen, Medizin-, Reinraum- und Labortechnik, Denkmalspflege etc.

Literatur

- /Wolf_95/ H. Wolf: "Optische 3D-Formerfassung großer Objekte", Workshop der Firma ABW GmbH an der Technischen Akademie Esslingen, 20.6.1995.
- /Schw_93/ J. Schwider, O. Falkenstörfer, H. Schreiber, A. Zöllner, N. Streibl: "New Compensating 4-Phase-algorithm for Phase Shifting Interferometry", Phys. Inst. UNI Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Angewandte Optik, 1993.
- /Stru_92/ T. Strutz, W. Riechmann, T. Stahs: "Tiefendatengewinnung mit dem Codierten Lichtansatz - Einsatzmöglichkeiten in der Automobilindustrie", Querschnittseminar Bildverarbeitung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. Berlin, 1992.
- /Lenz_89/ R. Lenz: "Gewinnung von Bilddaten mit CCD-Sensoren in der Videometrie", Proceedings Symposium Bildverarbeitung, Techn. Akademie Esslingen, Herausg. R.-J. Ahlers, 8. - 10. Nov. 1989.
- /Wahl_86/ Friedrich M. Wahl: "A Coded Light Approach for Depth Map Acquisition". 8. DAGM-Symposium Paderborn 1986, Springer Verlag 1986.

Der Autor dankt der Firma Dr. Duwe BV-Systeme, Tegernsee für die freundliche Überlassung der Abbildungen 6, 7, 8 und 9.