

KATALOG
DER
SENSORDATENBLÄTTER

MIT ERGEBNISSEN AUS DEM
BASE: ROUND-ROBIN-EXPERIMENT

Version vom 28.09.2016

1. PRÄAMBEL

Die Allianz 3Dsensation ist ein Konsortium, das sich zum Ziel gesetzt hat, die Mensch-Maschine-Interaktion mittels 3D-Sensorik zu revolutionieren. Um den Stand der Technik und Wissenschaft hierfür zu ermitteln, wurden im Jahr 2015 drei Basisvorhaben initiiert und durchgeführt: „3D-gestFus“, „3D-Sensorprinzipien“ und „Faktor Mensch“.

Das Basisvorhaben „3D-Sensorprinzipien“ erfasste, analysierte, strukturierte und bewertete die gesamte Kompetenz zur 3D-Datenerfassung (3D-Sensorik) innerhalb der Allianz „3Dsensation“. Dazu wurde innerhalb des Projektes ein einheitliches Sensor-Datenblatt entworfen, das eine einheitliche Charakterisierung und Beschreibung von unterschiedlichen 3D-Sensoren und 3D-Sensorprinzipien ermöglicht. Das Datenblatt umfasst, neben einer Beschreibung des Sensorprinzips bzw. des Sensors, über 50 Kenngrößen aus den Kategorien: Gerätebeschreibung, Funktionsbeschreibung, messtechnische Kenngrößen, Kenngrößen zu kleinsten Strukturen, zeitbezogenen Kenngrößen 3D, technische Daten eines elementaren Bildgebers, zeitbezogenen Kenngrößen eines elementaren Bildgebers, Umgebungseinfluss, Materialeinfluss (Messobjekt), Sonstige. Die Ermittlung und Beschreibung dieser Kenngrößen wird durch einen ausführlichen Messplan festgelegt (siehe „Erläuterung der Kenngrößen des Sensordatenblattes“ – *3Ds_Sensordatenblatt_Kenngrössenerläuterungen_(V280928).pdf*).

Zur Ermittlung des Stands der Technik und Wissenschaft bezogen auf die 3D-Sensorik/-Sensorprinzipien wurde im Basisvorhaben „3D-Sensorprinzipien“ ein *Round-Robin-Experiment* durchgeführt. Hierzu wurde durch die beteiligten Projektpartner und Unterauftragnehmer das Sensordatenblatt für unterschiedliche 3D-Sensoren/-Sensorprinzipien evaluiert. Der vorliegende Katalog fasst die Ergebnisse/Datenblätter dieser Evaluation zusammen und stellt sie der Allianz 3Dsensation zur Verfügung (siehe nachfolgende Seiten).

Es ist geplant, den Katalog fortwährend um neue Erkenntnisse aus der Allianz 3Dsensation zu erweitern. Der aktuelle Stand wird dazu auf dem Titelblatt vermerkt. Die Internetadresse der Veröffentlichung ist:

http://www.3d-sensation.de/de/Projekte/Basisvorhaben_Sensor.html

Jena, September 2016.

Inhaltsverzeichnis

Entwickler & Sensor	Datenblatt #
Fraunhofer IIS – Laser Lichtschnitt MB 100 x 50	1
Fraunhofer IIS – Laser Lichtschnitt MB 500 x 500	2
Fraunhofer IIS – Multikamera Array	3
Fraunhofer IIS – Shape from Focus	4
Fraunhofer IIS – Shape from Polarisation	5
Fraunhofer IIS – Time of Flight	6
Fraunhofer IOF – Clusteraugenkamera eCLAY 720p	7
Fraunhofer IOF – Handscanner	8
Fraunhofer IOF – GOBO <i>high-speed</i>	9
Fraunhofer IOF – GOBO <i>pic</i>	10
Fraunhofer IOF – Multiapertur Array Projektor	11
INB Vision AG - reflectCONTROL_COMPACT	12
INB Vision AG - scanCONTROL_29x0-100	13
INB Vision AG - surfaceCONTROL1400-500	14
INB Vision AG - surfaceCONTROL2000-400Z (Diffraktiv)	15
INB Vision AG - surfaceCONTROL2000-400Z (Speckle)	16
Otto von Guericke Universität – Active 3D Line	17
Otto von Guericke Universität – Active 3D Matrix	18
SIEMENS AG – 3D Scanner mit diffraktiver Musterprojektion	19
SIEMENS AG – Stereo Phase Shift 3D Scanner	20
ViALUX GmbH – zSnapper® 4M	21
ViALUX GmbH – zSnapper®4M XS	22
ViALUX GmbH – zSnapper® cart	23
ViALUX GmbH – zSnapper® portable	24

Die Sensordatenblätter werden ohne besonderen Vorzug in alphabetischer Reihenfolge in den Katalog eingepflegt, beginnend mit dem Hersteller/Entwickler/Tester und fortgeführt mit der Sensorbezeichnung.

Sensordatenblatt

#1

Laser-Lichtschnitt

Firma / Institution	Fraunhofer IIS
Sensorfamilie / Modell	Laser-Lichtschnitt-Sensor / Messbereich 100 x 50
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Laserlinie
Verfahrens-Präzisierung	

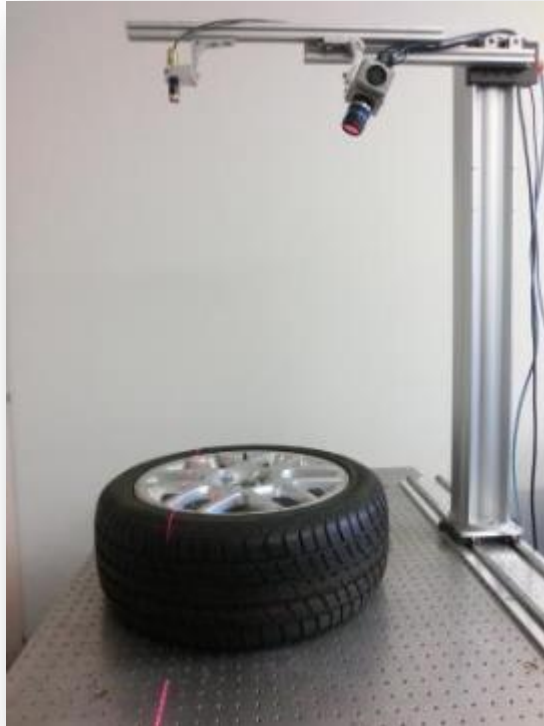



Abbildung 1: Laser-Lichtschnitt-Sensor



Abbildung 2: Sensor mit Gehäuse

Adresse	Berührungslose Mess- und Prüfsysteme - Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT – Fraunhofer IIS Flugplatzstraße 75 90768 Fürth	
Telefon	0049 911 58061-7251	
Email	guenther.kostka@iis.fraunhofer.de	
www	http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/zfp/tech/optische-3d-messtechnik.html	

Ausführliche Beschreibung

Übersicht

Das Laser-Lichtschnitt-Verfahren gehört zu den aktiven Triangulationsverfahren. Ein Laser-Lichtschnittsensor setzt sich aus einem Linienlaser-Projektor und einer 2D-Flächenkamera zusammen, die in einer festen Geometrie zueinander angeordnet sind. Eine solche Anordnung ermöglicht es nach dem Prinzip der Triangulation 2D-Höhenprofile eines Messobjekts zu erzeugen. Zur vollständigen 3-dimensionalen Erfassung eines Objekts ist eine Relativbewegung zwischen Sensor und Messobjekt erforderlich. Daher eignet sich das Verfahren insbesondere zur Prüfung und Vermessung von Objekten, die sich prozessbedingt bereits in Bewegung befinden (Inline-Prüfung, Vermessung rotierender Prüfteile). Für diese Anwendungsbereiche ist es zusätzlich vorteilhaft, dass mit dem Laser-Lichtschnitt-Verfahren sehr kurze Datenakquisitionszeiten, von bis zu 70.000 Höhenprofilen pro Sekunde, bei schritthaltender 3D-Rekonstruktion erreicht werden können. Aufgrund der vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten, wie etwa Auswahl, Konfiguration und geometrische Anordnung von Laser und Kamera, kann ein Laser-Lichtschnittsensor in einem breiten Spektrum von Anwendungsbereichen und -umgebungen eingesetzt werden.

Funktionsprinzip

Mit Hilfe eines Linienlasers wird ein Laser-Fächerstrahl auf die zu untersuchende Probenoberfläche projiziert. Die Schnittlinie zwischen Fächerstrahl und Objektfläche wird mit einer Messkamera unter einem definierten Winkel erfasst. Aus der vertikalen Position (y-Koordinate) der Linie im Kamerabild wird das Höhenprofil des Objektes berechnet (vgl. Abb. 1). Die Bestimmung der Linienposition erfolgt subpixel-genau über spezielle, konfigurierbare Algorithmen, die auf einen in der Messkamera integrierten FPGA implementiert sind. Durch diese Systemarchitektur werden die an den Messrechner zu übertragende Datenmenge sowie der Aufwand zur Weiterverarbeitung der Daten extrem reduziert. Dies wiederum ermöglicht kurze Prüfzeiten mit schritthaltender Auswertung.

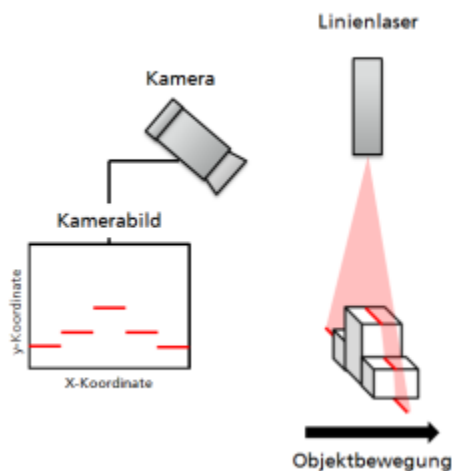


Abbildung 3: Messprinzip eines Laser-Lichtschnitt-Sensors

Für die 3-dimensionale Erfassung eines Objekts ist eine Relativbewegung zwischen Messsystem und Probe notwendig. Dazu wird z.B. die Probe mit konstanter Geschwindigkeit unter dem Sensor hindurchgefahren, während dieser fortlaufend Höhenprofile erzeugt. Durch das Aneinanderfügen mehrerer Höhenprofile ergibt sich ein vollständiger 3D-Datensatz der Probe. Ergänzend zu den Informationen über die 3D-Form der Oberfläche einer Probe, kann ein Laser-Lichtschnittsensor auch orts aufgelöste Werte für das Reflexionsvermögen (Helligkeit) der Oberfläche sowie für die lokale Breite der projizierten Laserlinie bereitstellen. Diese Größen sind intrinsisch auf die 3D-Messpunkte registriert und können, je nach Prüfaufgabe, sinnvolle Zusatzinformationen für die Weiterverarbeitung der 3D-Daten liefern.

Kalibrierung

Um die zu erfassende Objektfläche in einem definierten, metrischem Koordinatensystem darstellen zu können, muss der Laser-Lichtschnittsensor zunächst kalibriert werden. Dazu werden Höhenprofile eines Kalibrierobjekts mit bekannten Abmessungen aufgenommen. Aus diesen Messdaten kann die geometrische Anordnung der Sensorkomponenten sehr genau bestimmt werden. Sind diese geometrischen Parameter einmal bekannt, kann aus einem beliebigen Satz von subsequent aufgenommenen Höhenprofilen die Position der Messpunkte in metrischen Koordinaten berechnet werden.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	250x200x100 ¹	mm ³	
1.2	Gewicht	<3000 ¹	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	660 +/- <10	nm	
1.4	elektrische Leistung	10	W	
1.5	Versorgung	12 / 1 / -	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30 ²	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Laserklasse 3B	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	xx0.000-yy.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Ethernet (GigE Vision)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PLY}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	X,Y,Z, Intensität, Linienbreite	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	3D-Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	2D (Linienschnitt)	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	Kalibrierkörper ³	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	optional ⁴	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Schritthaltende Hochgeschw.- Vermessung von bewegten Objekten (Inline-Prüfung) mit vorwiegend diffus streuender Oberfläche	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	100x200x50 ⁵	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	200	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	{0,334; 0,468; 0,636} / {- 0,212; -0,003; 0,395} ⁶	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	{-1,421; -0,206; 0,712} ⁶	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	{0,267; 0,280; 0,299} ⁷	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,035	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	{0,000; 0,008; 0,058} ⁸	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	2.560.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 200	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	~ 55 ⁹	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	(0,09/0,10)/(0,12/0,10)	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	10	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	1000	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	50	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	1050	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	2.560.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	1	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	1	fps	

Nr.	Kenngroße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	AT C4-1280-GigE	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / (x,y)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1280 x 1024	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngroßen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,5	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	2000 ¹²	fps	
7.3	Pixelrate	655.360.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	> 46.000 ¹¹	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0 – 50 ¹²	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend ¹²	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	¹³	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	¹³	mm	
9.3	Transluzenz	Ja ¹⁴	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Sensor kann durch Gehäuse gekapselt und dadurch für verschiedenste Umgebungen einsatzfähig gemacht werden. Fusion der Daten verschiedener Lichtschnitt-Sensoren möglich (Multiview)	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Lichtschnitt-Verfahren besonders geeignet für bewegte Objekte	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	Mehrere Jahre	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0,25	h	
Systemkonfiguration der Kenngroßen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel Xeon @ 3.20Ghz / RAM: 12 GB / OS: Windows 7 SP1 / NET: Intel Gigabit ET2 Quad Port / GRAFIK: NVIDIA Quadro 2000			

Anhang A

¹ ohne Sensorgehäuse

² durch Gehäuse bis zu IP67 möglich

³ ebene, dunkle Platte mit regelmäßig angeordneten diffus streuenden, hellen Kreisen; Kantenlänge 100mm

⁴ bei Verwendung eines Drehtellers oder mehrerer Sensor-Einheiten ist eine Rundum-Ansicht möglich.

⁵ bei Verwendung einer längeren Verfahreinheit ist eine entsprechende Vergrößerung der Dimension H realisierbar.

⁶ {min; mean; max} aus allen aufgenommenen Prüfkörper Positionen.

⁷ {min; mean; max} aus allen aufgenommenen Prüfkörper Positionen. Abweichend von den Vorgaben des Sensorstemplates wurde der Prüfkörper nur in 3 verschiedenen Höhen des Messvolumens aufgenommen. Da es sich beim Laser-Lichtschnitt-Verfahren um ein scannendes Verfahren handelt, ist durch Verschiebungen des Ebenheitsnormals in Vorschub-Richtung keine Änderung der Ebenheitsmessung zu erwarten.

⁸ {min; mean; max}, diese Kenngröße wurde folgendermaßen berechnet: Fortlaufende Aufnahme von 1024 Höhenprofilen der Probekörperoberfläche ohne Vorschubbewegung. Danach Berechnung der Standardabweichung der zeitlichen Variation der Höhenwerte für alle Punkte des Profils. „mean“ ist die gemittelte Standardabweichung, „min“ und „max“ sind die minimalen und maximal auftretenden Werte der Standardabweichung.

⁹ geschätzter größter Polarwinkel, für den gerade noch Messpunkte für alle Azimutwinkel bestimmt werden konnten; Bestimmung noch nicht offiziell geklärt

¹⁰ es wurden Daten aufgenommen und ausgewertet, jedoch ist die Methode in der momentanen Implementierung zu rauschanfällig, um eine sinnvolle Auswertung zu ermöglichen (siehe Bericht Kap. 7.3.1).

¹¹ Diese Kenngröße wurde folgendermaßen bestimmt: Zeitlich fortlaufende Aufnahme von Höhenprofilen der Probekörperoberfläche ohne Vorschubbewegung (siehe ⁶). Danach Berechnung des Mittelwertes für jeden Profilwert (zeitliche Schwankungen werden so eliminiert). Die gemittelten Höhenwerte für jeden Profilwert werden von den gemittelten Höhenwerten unter Laborbeleuchtung abgezogen. Von den berechneten Differenzen wird Standardabweichung bestimmt. Durch den Einfluss der maximal einstellbaren Beleuchtungsstärke von 46.000 lx ergibt sich eine Standardabweichung von 0,019 mm in der Differenz der Höhenprofile. Damit ist der dadurch verursachte Messfehler kleiner als der Kenngrößenwert „lokales Rauschen“ (3.7). Da die Daten mit einer Laserleistung von 35 mW aufgenommen wurden, ist durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Lasers innerhalb der Laserklasse 3B (< 500 mW) eine weitere Verringerung des Fremdlichteinflusses möglich.

¹² Herstellerangaben

¹³ nicht bearbeitet

¹⁴ Volumenstreuung führt beim Laser-Lichtschnitt-Verfahren typischerweise zu einer systematischen Unterschätzung des Höhenmesswertes und damit zur einer rekonstruierten Oberfläche, die sich leicht unterhalb der tatsächlichen Oberfläche im Inneren des Messobjektes befindet.

Sensordatenblatt

#2

Laser-Lichtschnitt	
Firma / Institution	Fraunhofer IIS
Sensorfamilie / Modell	Laser-Lichtschnitt-Sensor / Messbereich 500 x 500
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Laserlinie
Verfahrens-Präzisierung	

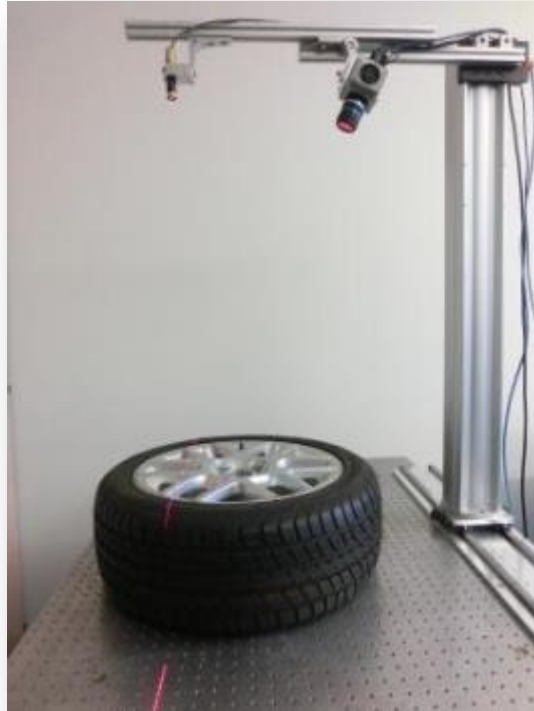



Abbildung 1: Laser-Lichtschnitt-Sensor



Abbildung 2: Sensor mit Gehäuse

Adresse	Berührungslose Mess- und Prüfsysteme - Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT – Fraunhofer IIS Flugplatzstraße 75 90768 Fürth	
Telefon	0049 911 58061-7251	
Email	guenther.kostka@iis.fraunhofer.de	
www	http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/zfp/tech/optische-3d-messtechnik.html	

Ausführliche Beschreibung

Übersicht

Das Laser-Lichtschnitt-Verfahren gehört zu den aktiven Triangulationsverfahren. Ein Laser-Lichtschnittsensor setzt sich aus einem Linienlaser-Projektor und einer 2D-Flächenkamera zusammen, die in einer festen Geometrie zueinander angeordnet sind. Eine solche Anordnung ermöglicht es nach dem Prinzip der Triangulation 2D-Höhenprofile eines Messobjekts zu erzeugen. Zur vollständigen 3-dimensionalen Erfassung eines Objekts ist eine Relativbewegung zwischen Sensor und Messobjekt erforderlich. Daher eignet sich das Verfahren insbesondere zur Prüfung und Vermessung von Objekten, die sich prozessbedingt bereits in Bewegung befinden (Inline-Prüfung, Vermessung rotierender Prüfteile). Für diese Anwendungsbereiche ist es zusätzlich vorteilhaft, dass mit dem Laser-Lichtschnitt-Verfahren sehr kurze Datenakquisitionszeiten, von bis zu 70000 Höhenprofilen pro Sekunde, bei schritthaltender 3D-Rekonstruktion erreicht werden können. Aufgrund der vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten, wie etwa Auswahl, Konfiguration und geometrische Anordnung von Laser und Kamera, kann ein Laser-Lichtschnittsensor in einem breiten Spektrum von Anwendungsbereichen und -umgebungen eingesetzt werden.

Funktionsprinzip

Mit Hilfe eines Linienlasers wird ein Laser-Fächerstrahl auf die zu untersuchende Probenoberfläche projiziert. Die Schnittlinie zwischen Fächerstrahl und Objektfläche wird mit einer Messkamera unter einem definierten Winkel erfasst. Aus der vertikalen Position (y-Koordinate) der Linie im Kamerabild wird das Höhenprofil des Objektes berechnet (vgl. Abb. 1). Die Bestimmung der Linienposition erfolgt subpixel-genau über spezielle, konfigurierbare Algorithmen, die auf einen in der Messkamera integrierten FPGA implementiert sind. Durch diese Systemarchitektur werden die an den Messrechner zu übertragende Datenmenge sowie der Aufwand zur Weiterverarbeitung der Daten extrem reduziert. Dies wiederum ermöglicht kurze Prüfzeiten mit schritthaltender Auswertung.

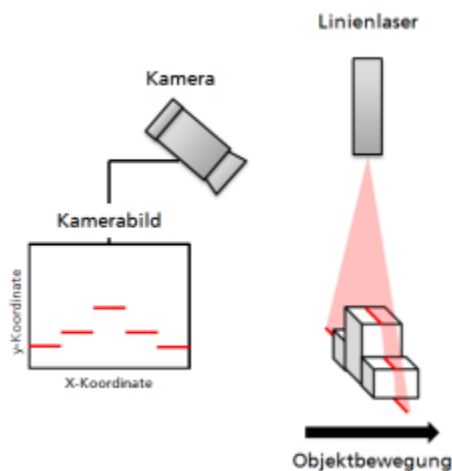


Abbildung 3: Messprinzip eines Laser-Lichtschnitt-Sensors

Für die 3-dimensionale Erfassung eines Objekts ist eine Relativbewegung zwischen Messsystem und Probe notwendig. Dazu wird z.B. die Probe mit konstanter Geschwindigkeit unter dem Sensor hindurchgefahren, während dieser fortlaufend Höhenprofile erzeugt. Durch das Aneinanderfügen mehrerer Höhenprofile ergibt sich ein vollständiger 3D-Datensatz der Probe. Ergänzend zu den Informationen über die 3D-Form der Oberfläche einer Probe, kann ein Laser-Lichtschnittsensor auch orts aufgelöste Werte für das Reflexionsvermögen (Helligkeit) der Oberfläche sowie für die lokale Breite der projizierten Laserlinie bereitstellen. Diese Größen sind intrinsisch auf die 3D-Messpunkte registriert und können, je nach Prüfaufgabe, sinnvolle Zusatzinformationen für die Weiterverarbeitung der 3D-Daten liefern.

Kalibrierung

Um die Objektoberfläche in einem definierten, metrischem Koordinatensystem darstellen zu können, muss der Laser-Lichtschnittsensor zunächst kalibriert werden. Dazu werden Höhenprofile eines Kalibrierobjekts mit bekannten Abmessungen aufgenommen. Aus diesen Messdaten kann die geometrische Anordnung der Sensorkomponenten sehr genau bestimmt werden. Sind die geometrischen Parameter einmal bekannt, kann aus einem beliebigen Satz von subsequent aufgenommenen Höhenprofilen die Position der Messpunkte in metrischen Koordinaten errechnet werden.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	400x200x100 ¹	mm ³	
1.2	Gewicht	<3500 ¹	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	660 +/- <10	nm	
1.4	elektrische Leistung	10	W	
1.5	Versorgung	12 / 1 / -	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30 ²	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Laserklasse 3B	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	xx0.000-yy.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Ethernet (GigE Vision)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PLY}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	X,Y,Z, Intensität, Linienbreite	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	3D-Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	2D (Linienschnitt)	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	Kalibrierplatte ³	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	optional ⁴	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Schritthaltende Hochgeschw.- Vermessung von bewegten Objekten (Inline-Prüfung) mit vorwiegend diffus streuender Oberfläche	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	500x500x500 ⁵	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	800	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	{0,306; 0,550; 1,295} / {- 0,282; -0,074; 0,059} ⁶	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	{-1,726; 0,658; 3,276} ⁶	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	{0,568; 0,725; 0,967} ⁷	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,082	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	{0,000; 0,017; 0,125} ⁸	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	5.880.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 350	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	~65 ⁹	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	(0,14/0,21)/(0,28/0,21)	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	¹⁰	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	7788	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	50	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	7838	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	754.992	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	0.128	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0.128	fps	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	AT C4-2350-GigE	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / (x,y)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2352 x 1728	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	3,115	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	321	fps	
7.3	Pixelrate	772.210.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	18.745 ⁹	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0 – 50 ¹²	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend ¹²	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	¹³	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	¹³	mm	
9.3	Transluzenz	Ja ¹⁴	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Sensor kann durch Gehäuse gekapselt und dadurch für verschiedenste Umgebungen einsatzfähig gemacht werden. Besonderheiten des SensorsFusion der Daten verschiedener Lichtschnitt-Sensoren möglich (Multiview)	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Lichtschnitt-Verfahren besonders geeignet für bewegte Objekte	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	Mehrere Jahre	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0,25	h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel Xeon @ 3.20Ghz / RAM: 12 GB / OS: Windows 7 SP1 / NET: Intel Gigabit ET2 Quad Port / GRAFIK: NVIDIA Quadro 2000			

Anhang A

¹ ohne Sensorgehäuse

² durch Gehäuse bis zu IP67 möglich

³ ebene, dunkle Platte mit regelmäßig angeordneten diffus streuenden, hellen Kreisen; Kantenlänge 300mm

⁴ bei Verwendung eines Drehtellers oder mehrerer Sensor-Einheiten ist eine Rundum-Ansicht möglich.

⁵ bei Verwendung einer längeren Verfahreinheit ist eine entsprechende Vergrößerung der Dimension H realisierbar.

⁶ {min; mean; max} aus allen aufgenommenen Prüfkörper Positionen.

⁷ {min; mean; max} aus allen aufgenommenen Prüfkörper Positionen. Abweichend von den Vorgaben des Sensorstemplates wurde der Prüfkörper nur in 3 verschiedenen Höhen des Messvolumens aufgenommen. Da es sich beim Laser-Lichtschnitt-Verfahren um ein scannendes Verfahren handelt, ist durch Verschiebungen des Ebenheitsnormals in Vorschub-Richtung keine Änderung der Ebenheitsmessung zu erwarten. Aus Mangel an Verfügbarkeit wurde ein nach VDI2634 zu kurzes Ebenheitsnormal mit $l = 0,35L_0 < 0,49L_0$ verwendet.

⁸ {min; mean; max}, diese Kenngröße wurde folgendermaßen berechnet: Fortlaufende Aufnahme von 1024 Höhenprofilen der Probekörperoberfläche ohne Vorschubbewegung. Danach Berechnung der Standardabweichung der zeitlichen Variation der Höhenwerte für alle Punkte des Profils. „mean“ ist die gemittelte Standardabweichung, „min“ und „max“ sind die minimalen und maximal auftretenden Werte der Standardabweichung.

⁹ geschätzter größter Polarwinkel, für den gerade noch Messpunkte für alle Azimutwinkel existieren; Bestimmung noch nicht offiziell geklärt

¹⁰ es wurden Daten aufgenommen und ausgewertet, jedoch ist die Methode in der momentanen Implementierung zu rauschanfällig, um eine sinnvolle Auswertung zu ermöglichen (siehe Bericht Kap. 7.3.1).

¹¹ Diese Kenngröße wurde folgendermaßen bestimmt: Zeitlich fortlaufende Aufnahme von Höhenprofilen der Probekörperoberfläche ohne Vorschubbewegung (siehe ⁶). Danach Berechnung des Mittelwertes für jeden Profilwert (zeitliche Schwankungen werden so eliminiert). Die gemittelten Höhenwerte für jeden Profilwert werden von den gemittelten Höhenwerten unter Laborbeleuchtung abgezogen. Von den berechneten Differenzen wird Standardabweichung bestimmt. Bei einer Beleuchtungsstärke von 18.745 lx (linear zwischen zwei Messpunkten interpoliert) gleicht der durch Fremdlicht verursachte Messfehler mit 0,082 mm dem Kenngrößenwert „lokales Rauschen“ (3.7). Da die Daten mit einer Laserleistung von 100 mW aufgenommen wurden, ist durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Lasers innerhalb der Laserklasse 3B (< 500 mW) eine Verringerung des Fremdlichteinflusses möglich.

¹² Herstellerangaben

¹³ nicht bearbeitet

¹⁴ Volumenstreuung führt beim Laser-Lichtschnitt-Verfahren typischerweise zu einer systematischen Unterschätzung des Höhenmesswertes und damit zur einer rekonstruiertes Oberfläche, die sich leicht unterhalb der tatsächlichen Oberfläche im Inneren des Messobjektes befindet.


Sensordatenblatt

#3

Multikamera Array

Firma / Institution	Fraunhofer IIS
Sensorfamilie / Modell	Prototyp
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → passiv → Stereo, Photogrammetrie → multiokular
Verfahrens-Präzisierung	



Adresse	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen	 Fraunhofer IIS
Telefon	+49 9131 776-0	
Email	movingpictures@iis.fraunhofer.de	
www	http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/bsy/tech/lichtfeld.html	

Ausführliche Beschreibung

Hintergrund

Multikamerasysteme erlauben die Aufnahme von sogenannten Lichtfeldern für die Videoproduktion. Dadurch ist es möglich, nach der Aufnahme die Bilder kreativ zu verändern, indem z.B. der Fokuspunkt, die Tiefenschärfe oder gar der Standort der Kamera nachträglich verändert wird. Außerdem ist es möglich, die Szene in ihrer Tiefe zu vermessen, und diese Information wiederum für die Bildverarbeitung einzusetzen, z.B. für Relighting oder die tiefenbasierte Objektauswahl.

Wenngleich eine metrische Kalibrierung hier nicht unbedingt von Nöten ist, so kann sie doch für eine Szenenmodellierung hilfreich sein. Außerdem wäre es dann möglich, auch neue Anwendungen transdisziplinär zu bedienen.

Das vorliegende Datenblatt gibt daher eine erste Charakterisierung eines Multikameraprototyps wieder, wie es vom Fraunhofer IIS entwickelt wurde.

Grundprinzip der passiven Tiefenschätzung

Multikamerasysteme erlauben eine passive Tiefenmessung gemäß dem Stereoprinzip. Dazu werden in zwei Kameras korrespondierende Bildpunkte gesucht, welche den gleichen Objektpunkt zeigen. Sofern der Abstand der beiden Kameras bekannt ist, kann aus folgender einer vereinfachten Formel der Objektabstand g berechnet werden:

$$d^s = \frac{r}{\frac{f}{g} - 1} \approx \frac{f}{g} \cdot r$$

r : Kameraabstand

f : Brennweite der Objektive

g : Abstand des Objektes von der Eintrittspupille der Kamera

$d^s = B1 - B2$: Disparität des Pixels als Unterschied der Koordinaten im rechten und linken Bild

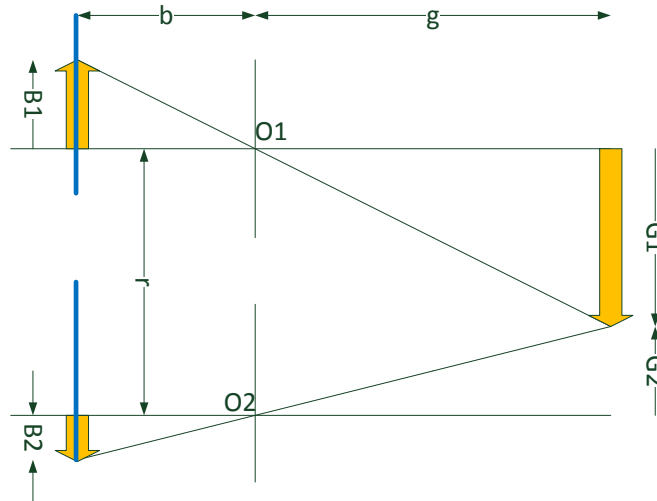


Abbildung 1: Prinzip der passiven Tiefenschätzung (O1, O2: optische Zentren der Kameras)

Eine aktive Beleuchtung ist nur bei ungenügender Umgebungshelligkeit nötig. Dadurch zeichnen sich passive Verfahren durch eine hohe Störlichtunempfindlichkeit aus. Dagegen ist es für Objekte ohne Textur schwierig, präzise Tiefenwerte zu bestimmen.

Erweiterung auf Multikamera Geometrien

Das Vorhandensein mehrerer Kameras gestattet die Berechnung mehrerer Tiefenkarten wie in Abbildung 2 dargestellt. So stehen für Kamera 5 beispielsweise 4 Tiefenkarten aus den horizontalen und vertikalen Nachbarn zu Verfügung. Diese redundante Information bringt folgende Vorteile:

- Bessere Auflösung von Verdeckungen, wenn ein Objekt beispielweise nur in Kamera 5 und Kamera 2 sichtbar ist, weil es in den anderen Kameras durch andere Objekte verdeckt wird.
- Muster, welche in horizontaler Richtung periodische Strukturen aufweisen, können in vertikaler Richtung aufgelöst werden und umgekehrt.
- Das Rauschen der Tiefenkarten sowie etwaige Schätzfehler können durch Abgleich der einzelnen Tiefenkarten erkannt und reduziert werden.

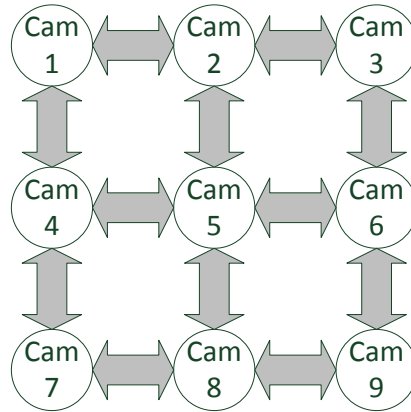


Abbildung 2: Multikamera Tiefenschätzung. Pfeile entsprechen einer Stereotiefenschätzung

Darüber hinaus ist es möglich, durch spezielle Kamerakonfigurationen den Dynamikumfang zu vergrößern [1].

Verarbeitungskette

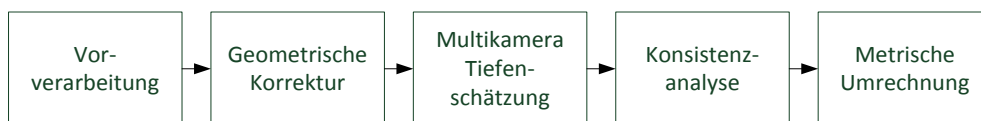


Abbildung 3: Verarbeitungskette

Die Verarbeitungskette besteht aus 5 elementaren Verarbeitungsschritten. Die Vorverarbeitung bereitet die Kamerarohdaten in darstellbare Bilddaten auf. Die geometrische Korrektur kompensiert Abweichungen zwischen tatsächlicher und idealer Kameraausrichtung (Kameraachsen senkrecht zum Array ausgerichtet, identische Kameraabstände in horizontaler und vertikaler Richtung). Dann werden die unterschiedlichen Tiefenkarten ermittelt, deren Qualität durch die Konsistenzanalyse erhöht wird. Schließlich erfolgt die Umrechnung in metrische Koordinaten wie oben beschrieben.

Eigenschaften des Prototyps

Der Prototyp besteht aus 9 Kameras des Herstellers Basler (acA2000-50gc), sowie 12mm Objektiven von Kowa. Die Kameras werden mittels 1G Ethernet Kabeln an einen Switch angeschlossen, welcher wiederum mit 10Gbit/s mit einem Rechner verbunden ist. Dadurch ist eine Aufzeichnung in Videoframeraten möglich.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt mittels Matlabskripten, welche teilweise externe C++ Module aufrufen. Dadurch ist die erzielbare Verarbeitungsgeschwindigkeit deutlich kleiner als in einem Endprodukt.

Referenzen:

[1] Joachim Keinert, Marcus Wetzel, Michael Schöberl, Peter Schäfer, Frederik Zilly, Michel Bätz, Siegfried Föbel, André Kaup: "Cost-effective multi-camera array for high quality video with very high dynamic range", Proc. SPIE 9023, Digital Photography X, 90230Y (March 7, 2014)

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	¹	mm ³	
1.2	Gewicht	²	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	ca. 330 - 910 ³	nm	
1.4	elektrische Leistung	⁴	W	
1.5	Versorgung	⁵	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Via Power over Ethernet (IEEE 802.3af) or camera's 6-pin Hirose connector	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	⁶	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	⁷	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	⁸	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	X,Y, RGB	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	Maßstab; Halterung für Objekte; einfarbiger Hintergrund für Messungen; beliebige Objekte zur Rektifizierung; Stab mit bekannter Länge	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Postproduktion von Filmmaterial(Matrix-Effekt, virtuelle Kamerafahrten, Dolly-Zoom-Effekt), Beleuchtungs-Engineering, HDR, 3D Ansichten, Stop-Motion-Filme	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	ca. 600x425x600 ⁹	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	ca. 850	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	Zylinder: 11,29 / -0,32 Kugel ¹⁰ : 54,79/ 1,51	mm	

¹ (zu 1.1) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

² (zu 1.2) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

³ (zu 1.3) Siehe Datenblatt CMOSIS CMV2000 .

⁴ (zu 1.4) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

⁵ (zu 1.5) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

⁶ (zu 1.9) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

⁷ (zu 1.10) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

⁸ (zu 1.11) Nicht festgelegt, da es sich bei dem Prüfobjekt um einen Prototypen handelt.

⁹ (zu 3.1) Kamera und Messobjekte werden auf Stativen befestigt und mit Hilfe eines Maßstabes justiert. Das Messvolumen kann deswegen nur mit einer gewissen Ungenauigkeit angegeben werden.

¹⁰ (zu 3.3) Angegeben ist die maximale Abweichung. Reflektionen der Lichtquellen auf der Kugeloberfläche führen zu fehlerhaften Messwerten und Ausreißern. Stark abweichende Messpunkte wurden ausgeschlossen, um die Auswertungen

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	-8,35 ¹¹	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	¹²	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	15,02 ¹³	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	1,52	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,31 / 0,01 / 2,59 ¹⁴	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	¹⁵	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)		Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	65/ 65 / 65	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	¹⁶	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	(0,3 / 0,3) / (0,6 / 0,6)	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	¹⁷	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	35 ¹⁸	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	72 · 10 ⁵ ¹⁹	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	72 · 10 ⁵ ²⁰	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	²¹	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	30 ²²	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	1,4 · 10 ⁻⁷	fps	

durchführen zu können. In Stichproben, in denen alle Ausreiser entlang der Reflektionen ausgeschlossen wurden, konnte die Antastabweichung P_F auf 11,7 mm reduziert werden.

¹¹ (zu 3.4) Als Prüfkörper dient ein Stab mit 600mm Länge. Es werden fünf verschiedene Aufnahmen mit diesem ausgewertet, - vier Positionen des Stabes verlaufen parallel zum Kameraarray. Spiegelungen auf den Oberflächen der Kugeln, die an den Enden des Prüfkörpers angebracht sind, führen dazu, dass Messungen verworfen werden. Der Stab kann auf Grund fehlender Ausstattung nicht genau parallel zur Front des Messvolumens oder zu den vertikalen Diagonalebene ausgerichtet werden. Die geforderten Positionen werden bestmöglich umgesetzt. Die Koordinaten der Stabenden wurden manuell aus den Messdaten bestimmt und der Längenunterschied zum kalibrierten Prüfkörper berechnet.

¹² (zu 3.5) Nicht bearbeitet.

¹³ (zu 3.6) Der Prüfkörper wird auf einem Stativ im Messvolumen positioniert und mit Hilfe eines Meterstabs justiert. Die Ebene kann auf Grund fehlender Ausstattung nicht genau parallel zur Front des Messvolumens oder zu den vertikalen Diagonalebene ausgerichtet werden. Die geforderte Position wird bestmöglich umgesetzt. Der Prüfkörper hat eine gewisse Oberflächenrauigkeit, die jedoch bei gegebener Messgenauigkeit vernachlässigbar ist. Die Messung in der Position parallel zur Raumdiagonalen ist fehlerhaft und wurde daher nicht ausgewertet.

¹⁴ (zu 3.8) Bei der Ermittlung des zeitlichen, lokalen Rauschens werden nur Pixel mit einem Wert ungleich Null einbezogen. Denn Pixel mit einem invaliden Wert werden von den verwendeten Filtern auf Null gesetzt und können somit nicht mit den validen Pixeln anderer Bilder verglichen werden.

¹⁵ Siehe 3.13

¹⁶ (zu 3.12) Wegen Spiegelungen in der Oberfläche der Kugel, die zu Ausreisern und stark abweichenden Messwerten führte, konnte diese Kennzahl nicht bestimmt werden.

¹⁷ (zu 4.1) Nicht bearbeitet.

¹⁸ (zu 5.1) Belichtungszeit der Bildaufnahmen kann auf die Lichtverhältnisse während der Messung angepasst werden und ist daher nicht bei allen Aufnahmen identisch.

¹⁹ (zu 5.2) Eine lange Rechenzeit wird benötigt, da Implementierung und Auswertung im Moment in MATLAB realisiert ist. Der Algorithmus ist nicht bezüglich der Laufzeit optimiert. Die Rechenzeit ist von der untersuchten Szene abhängig.

²⁰ (zu 5.3) Eine lange Rechenzeit wird benötigt, da Implementierung und Auswertung im Moment in MATLAB realisiert ist. Der Algorithmus ist nicht bezüglich der Laufzeit optimiert. Die Rechenzeit ist von der untersuchten Szene abhängig.

²¹ (zu 5.4) Nicht bearbeitet.

²² (zu 5.5) Die Belichtungszeit wurde auf die gegebenen Lichtverhältnisse angepasst und ist daher nicht bei allen Aufnahmen gleich.

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	acA2000-50gc	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	Flächenkamera: 2D Matrix	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 1086	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	9	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	35	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	50	fps	
7.3	Pixelrate	$111,2 \cdot 10^6$	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	²³	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	²⁴	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	²⁵	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	²⁶	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	²⁷	mm	
9.3	Transluzenz	²⁸	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	-	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	-	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	-	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	-	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	-			

²³ (zu 8.1) Dass Messobjekt muss beleuchtet werden, der erlaubter Bereich wurde nicht bestimmt. Über Objektivblenden der Kameras kann die auf den Sensor treffende Lichtmenge nach Bedarf angepasst werden. Gerichtete Reflektionen auf dem Messobjekten führen auch bei geringen Beleuchtungsstärken zu fehlerhaften Daten und sollten daher vermieden werden. Über Objektivblenden der Kameras kann die auf den Sensor treffende Lichtmenge nach Bedarf angepasst werden.

²⁴ (zu 8.2) Nicht bearbeitet.

²⁵ (zu 8.3) Nicht bearbeitet.

²⁶ (zu 9.1) Nicht bearbeitet.

²⁷ (zu 9.2) Nicht bearbeitet.

²⁸ (zu 9.3) Nicht bearbeitet.

Anhang A

Beispielaufnahmen

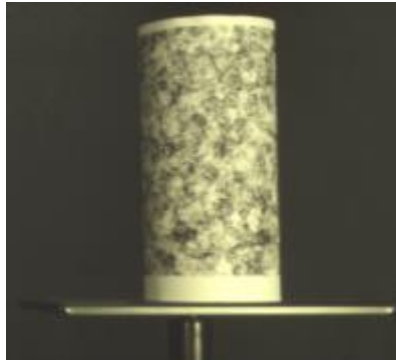
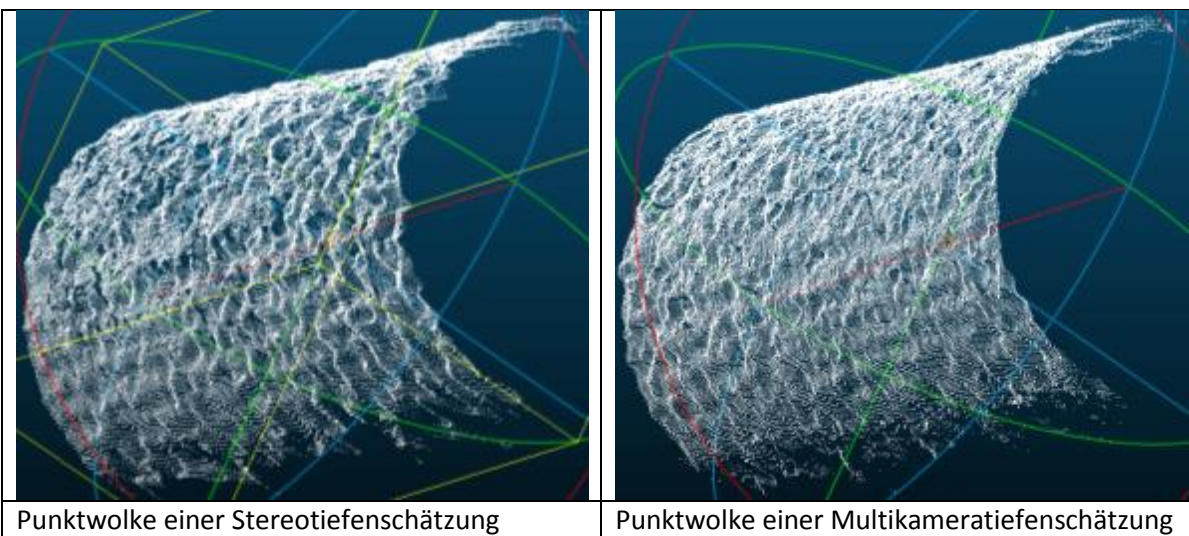


Abbildung 4: Aufnahme eines Zylinders



Punktwolke einer Stereotiefenschätzung

Punktwolke einer Multikameratiefenschätzung

Abbildung 5: Resultierende Punktwolken




Offene Herausforderungen

Der beschriebene Prototyp weist noch folgende Herausforderungen auf:

- Große Rechenzeiten aufgrund des hohen Datenvolumens, welches mittels Matlab verarbeitet wird
- Schwierigkeiten im Umgang mit nicht-kooperativen Oberflächen

Sensordatenblatt

#4

Messverfahren Shape From Focus in der Mikroskopie			
Firma / Institution	Fraunhofer IIS		
Sensorfamilie / Modell	Mikroskopisches Shape From Focus System		
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Intensität → Shape from Focus		
Verfahrens-Präzisierung	Passives optisches Verfahren, 3D-Rekonstruktion anhand der Fokusposition jedes Objektpunktes		
Adresse	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Fraunhofer IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen </td> <td style="width: 50%; text-align: right;">  </td> </tr> </table>	Fraunhofer IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen	
Fraunhofer IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen			
Telefon	0049 9131 776-7306		
Email	michaela.benz@iis.fraunhofer.de		
www	http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/med/profil/medizinische-bildverarbeitung/mikroskopie.html		

Ausführliche Beschreibung**Grundprinzip »Shape from Focus«**

Beim »Shape from Focus« Verfahren handelt es sich um ein passives optisches Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Objekten. Die Grundidee dieses Verfahrens liegt darin, dass die Fokusposition eines Objektpunktes bei einer optischen Abbildung Rückschlüsse auf dessen Abstand zum optischen System ermöglicht und somit Höheninformation kodiert. Bildet man ein Objekt mit einem optischen System ab, werden nicht alle Punkte auf dessen Oberfläche gleichzeitig scharf abgebildet, wenn die Höhenvariationen der Objektoberfläche größer sind als der Tiefenschärfebereich des optischen Systems. Variiert man nun entweder den Abstand zwischen Objekt und optischen System oder Eigenschaften des optischen Systems, die zu einer veränderten Fokusposition führen und nimmt eine Sequenz von Bildern auf, kann daraus eine Tiefenkarte des Objektes erstellt werden. Dazu bewertet man für jeden Objektpunkt wie scharf er in den einzelnen Bildern der aufgenommenen Sequenz dargestellt ist. Anhand der daraus abgeleiteten besten Fokusposition kann dem Objektpunkt eine entsprechende Höhe zugewiesen werden.

Dieses Verfahren kann sehr gut mit einem Mikroskop, welches über eine motorisierte Bühne verfügt, umgesetzt werden. Durch Verfahren der Bühne mit einer fest vorgegebenen Schrittweite relativ zum Objektiv kann hier die zur Generierung der Tiefenkarte erforderliche Bildsequenz erstellt werden. Alternativ finden sich auch Ansätze in der Literatur, bei denen mehrere Fokusebenen simultan aufgenommen werden können [1].

Gängige Umsetzungen des »Shape from Focus« Verfahren in der Literatur

Eine 3D-Rekonstruktion basierend auf dem »Shape from Focus« Verfahren enthält typischerweise die drei folgenden Teilschritte [2]:

- Bildgewinnung und Vorverarbeitung
- Bestimmung der Fokusposition pro Bildpunkt
- Höhen- und Oberflächenrekonstruktion

Ausgangspunkt für die Anwendung des Verfahrens ist, dass Bildsequenzen für die gesamte Objektoberfläche aufgenommen wurden. Neben der reinen Bildaufnahme werden in der Literatur noch unterschiedliche Vorverarbeitungsschritte durchgeführt. Diese Schritte wie Registrierung und Artefakt-Unterdrückung sind nicht zwingend zur 3D-Rekonstruktion erforderlich. Eine Registrierung sollte dann durchgeführt werden, wenn ein lateraler Versatz zwischen einzelnen Aufnahmen einer Bildsequenz besteht. Die Entfernung von Artefakten in den Ausgangsbildern hat zum Ziel, die Güte der 3D-Rekonstruktion zu erhöhen. Hierunter fallen z.B. Beleuchtungskorrektur [2], Rauschunterdrückung durch Anwendung von Filtern [3] oder Vorsegmentierung der für die 3D-Rekonstruktion relevanten Bereiche [3].

Im zweiten Schritt erfolgt dann die Berechnung eines Schärfemaßes für jeden Bildpunkt jeder Aufnahme innerhalb der Bildsequenz. Hier kommen verschiedenste Schärfemaße und auch Kombinationen von Maßen zum Einsatz [4], [5]. Zudem unterscheiden sich die Ansätze in der berücksichtigten Nachbarschaft. Weit verbreitet ist die Verwendung von 2D-Fenster mit fest gewählter Größe, aber auch die Verwendung von Fenster mit einer adaptiven Größe [6] oder Multiskalenansätze werden in der Literatur beschrieben. Weitere Ansätze berücksichtigen die 3D-Nachbarschaft zum Teil kombiniert mit einer Hauptachsentransformation basierend auf allen Punkten der Bildsequenz [7] zur Bestimmung der besten Fokuspositionen der Objektpunkte.

Liegen nun alle Schärfewerte für alle Punkte im betrachteten Bereich vor, geht es im nächsten Schritt darum, die Lage des Maximums in den Fokuskurven, welche durch die Schärfewerte gegeben sind, zu bestimmen. Naheliegend ist jeweils die Interpolation der Fokuskurve basierend auf den berechneten Schärfewerten für jeden einzelnen Objektpunkt. Die Position des Maximums korreliert direkt mit dem Höhenwert des Objektpunktes. Die punktweise Bestimmung der Höhenwerte begünstigt allerdings das Auftreten von Artefakten in der 3D-Rekonstruktion. Diese können dann entweder in einem Nachverarbeitungsschritt durch

Approximationsverfahren unterdrückt werden oder es werden alternativ direkt bei der Berechnung der Schärfemaße oder der Bestimmung der Maxima Teilstücke [8] oder sogar die gesamte Objektoberfläche betrachtet.

Auf dem Markt sind verschiedene freie und kostenpflichtige Softwarelösungen (z.B. *Combine Z5*, *Helicon focus*) verfügbar, welche die 3D-Rekonstruktion basierend auf vorliegenden Bildsequenzen ermöglichen. In [9] findet sich eine kurze Bewertung einiger Programme.

Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion

Die prinzipiell erzielbare Genauigkeit der Höhenrekonstruktion des »*Shape from Focus*« Verfahrens mit einem mikroskopischen System wird in [10] betrachtet. Nach Zamofing et al. kann die z-Genauigkeit (z_{acc}) durch folgende Formel aus der Vergrößerung β und dem Durchmesser des bildseitigen Beugungsscheibchens u , auf den ein Objektpunkt durch das Systems abgebildet wird, berechnet werden:

$$z_{acc} = \frac{1+\beta}{\beta^2} \cdot 2 \cdot u \quad (F1)$$

Dabei ist zu beachten, dass Zamofing et al. in der Herleitung ein System mit einer numerischen Apertur nahe 1 betrachten und annehmen, dass der Durchmesser des Beugungsscheibchens deutlich kleiner als die Tiefenschärfe des Systems ist. Trifft die zweite Annahme nicht zu, muss laut [10] bei der Berechnung noch die Tiefenschärfe D_{ep} und objektseitige Brennweite f des Systems berücksichtigt werden:

$$z_{acc} = \frac{2f(1+\beta)\frac{u}{D_{ep}}}{\beta^2 - \frac{u^2}{D_{ep}^2}} \quad (F2)$$

Aus diesen Formeln ergibt sich somit die direkte Abhängigkeit der erzielbaren Messgenauigkeit von folgenden Größen des optischen Systems:

- Vergrößerung
- Punktantwort (Durchmesser des Beugungsscheibchens)
- Brennweite
- Tiefenschärfe

Jedoch hat nicht nur das optische System Einfluss auf die Güte der 3D-Rekonstruktion. So wird bei der Aufnahme der Bildstapel jedem Bild aus der Sequenz eine z-Position zugewiesen. Fehler bei der Bestimmung dieser z-Position haben direkt Einfluss auf die erstellte Höhenkarte. Speziell bei der Realisierung durch ein Mikroskop mit motorisierter Bühne wird die z-Position durch die Schrittweite zwischen den einzelnen Aufnahmen bestimmt. Daher sollte gewährleistet sein, dass die Verfahrensgenauigkeit der Bühne in z-Richtung deutlich kleiner als die angestrebte Genauigkeit der Höhenkarte ist.

Eine korrekte 3D-Rekonstruktion setzt zudem voraus, dass für jeden Objektpunkt die schärfste Position korrekt bestimmt wurde. Es gibt dabei vielfältige Einflussfaktoren, welche die Bestimmung der schärfsten Position beeinträchtigen können. So wird beispielsweise in [11] untersucht, wie robust verschiedene Schärfemaße gegenüber Rauschen in den Ausgangsbildern sind. Auch die Anzahl der aufgenommenen Bilder innerhalb einer Bildsequenz und deren Abstand hat Einfluss auf die Bestimmung des Maximums der Fokuskurve und somit auf die Qualität der 3D-Rekonstruktion [12]. Eine starke Auswirkung hat ebenfalls die Textur des betrachteten Objektes [12], da letztendlich die Berechnung der Schärfe auf einer Bestimmung des Kontrastes beruht. Hierin liegt auch einer der Hauptnachteile des Verfahrens: es ist darauf angewiesen, dass das Objekt eine Textur aufweist [13] oder es ist zusätzlich eine Projektion eines Musters auf das Objekt erforderlich [14]. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Größe der Nachbarschaft, die zur Berechnung des Schärfemaßes herangezogen wird [6] in Kombination mit dem Höhenprofil der Objektoberfläche selbst (glatte Oberfläche vs. stark variierende Höhe mit vielen Details). Insbesondere bei mikroskopischen Aufnahmen transparenter Objekte ist es zudem möglich, dass sich die Bilder zweier Objektpunkte derart an einem Bildpunkt überlagern, dass mehrere Maxima in der Fokuskurve auftreten und dadurch Mehrdeutigkeiten entstehen [12] was zu Fehlern in der 3D Rekonstruktion führen kann. Ebenso können Beleuchtungseffekte

(z.B. dunkle Bildbereiche) in den Ausgangsdaten in einer nicht korrekten Höhenbestimmung resultieren [15].

Referenzen

- [1] Duocastella, M.; Sun, B.; Stone, H. & Arnold, C.: Simultaneous acquisition of multiple focal planes for real time 3-D microscopy using ultra-high speed adaptive optics. In: CLEO Technical Digest (2012)
- [2] Muhammad, M. S. & Choi, T.: An unorthodox approach towards shape from Focus. In: 18 th IEEE International Conference on Image Processing., 2011
- [3] Lee, I.; Mahmood, M.; Shim, S. & Choi, T.: Optimizing Image Focus For 3D Shape Recovery Through Genetic Algorithm. In: Multimed Tools Appl 71 (2014), S. 247-262
- [4] Huang, W. & Jing, Z.: Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion. In: Pattern Recognition Letters 28 (2007), Nr. 4, S. 493—500
- [5] Kaleem, M.: Combining Focus Measures Through Genetic Algorithm for Shape From Foc. In: Proc. of Information Science and Applications (ICSIA) - (2014), S. 1-4
- [6] Lee, I.; Mahmood, M. T. & Choi, T.-S.: Adaptive window selection for 3D shape recovery from image focus. In: Optics & Laser Technology 45 (2013), S. 21—31
- [7] Fernandes, M.; Gavet, Y. & Pinoli, J.-C.: Robust shape-from-image-focus by 3-D multivariate statistical analyses. In: Image Processing (ICIP), 2011 18th IEEE International Conference on., 2011, S. 2069—2072
- [8] Yun, J. & Choi, T.-S.: Accurate 3-D shape recovery using curved window focus measure. In: Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on., 1999, S. 910—914
- [9] Piper, J.: Modern Research and Educational Topics in Microscopy. In: Mendez-Vilas, A. & Diaz, J. (Hrsg.): Formatex., 2007, S. 900-905
- [10] Zamofing, T. & Hügli, H.: Applied Multifocus 3D microscopy. In: Proc. of SPIE Two- and Three-Dimensional Vision Systems for Inspections, Control and Metrology 5265 (2004), S. 134-144
- [11] Malik, A. S. & Choi, T.-S.: A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3D shape recovery in the presence of noise. In: Pattern Recognition 41 (2008), Nr. 7, S. 2200—2225
- [12] Dierig, T.: Gewinnung von Tiefenkarten aus Fokuserien, Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität-Heidelberg, 2002
- [13] Billiot, B.; Cointault, F.; Journaux, L.; Simon, J.-C. & Gouton, P.: 3D Image Acquisition System Based on Shape from Focus Technique. In: Sensors 13 (2013), S. 5040-5053
- [14] Lenz, M.; Ferstl, D.; Ruther, M. & Bischof, H.: Depth coded shape from focus. In: Computational Photography (ICCP), 2012 IEEE International Conference on., 2012, S. 1—8
- [15] Malik, A. S. & Choi, T.-S.: Consideration of illumination effects and optimization of window size for accurate calculation of depth map for 3D shape recovery. In: Pattern Recognition 40 (2007), Nr. 1, S. 154—170

Sensordatenblatt

#5

Shape From Polarization

Firma / Institution	Fraunhofer IIS
Sensorfamilie / Modell	CMOS-Bildsensor mit Nanodraht-Polarisationsarray / Modell-POL02T
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Tiefe aus Polarisation → passiv → Polarisation der Reflexionen → Neigung der Oberflächennormalen
Verfahrens-Präzisierung	Passives, monokulares Oberflächenneigungsmessverfahren durch Polarisation, Rekonstruktion von relativen Distanzen durch Bestimmung der Oberflächennormalen aus den Polarisationseigenschaften der aufgenommenen Reflexionen

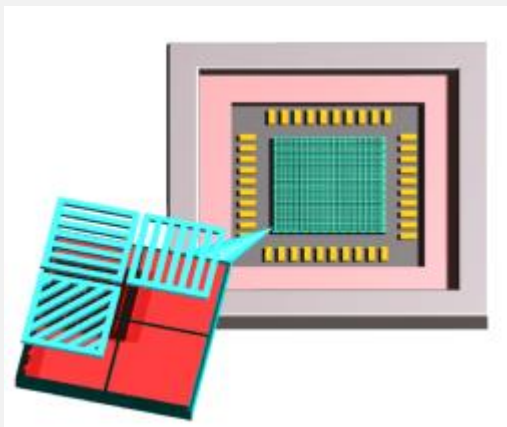


Abbildung 1: Sensor mit nanostrukturiertem Polfilterarray

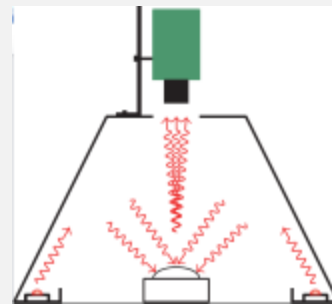


Abbildung 2: Dombeleuchtung

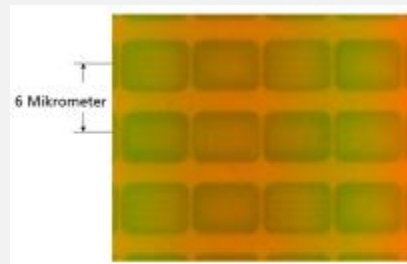


Abbildung 3: Pixelabstand



Abbildung 4: Polarisationskamera Polka

Adresse	Bildsensorik Fraunhofer IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen	
Telefon	0049 9131 776-5150	
Email	Arne.Nowak@iis.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/POLKA	

Ausführliche Beschreibung

Shape from Polarization

Der „Shape-from-Polarization“-Ansatz basiert auf der wesentlichen Beobachtung, dass wenn einfallendes, unpolarisiertes Licht auf dielektrischen Materialien trifft, das reflektierende Licht abhängig vom Einfallswinkel und Brechungsindex des Mediums partiell linear polarisiert wird [1]. Mit heutigen Polarisationskameras ist es möglich die Polarisationsmerkmale dieser reflektierenden Lichtstrahlen mit einem Bild anzuzeigen. Über die Polarisationsmerkmale der Reflexionen lässt sich bei bekanntem Brechungsindex wiederum ein Zusammenhang zu den Oberflächennormalen des beleuchteten Körpers herstellen. Ähnlich wie beim bekannten „Shape-from-Shading“-Ansatz werden aus Gradientenfeldern, die sich aus dem Feld der Flächennormalen ergeben, 3D-Höhenprofile erzeugt.

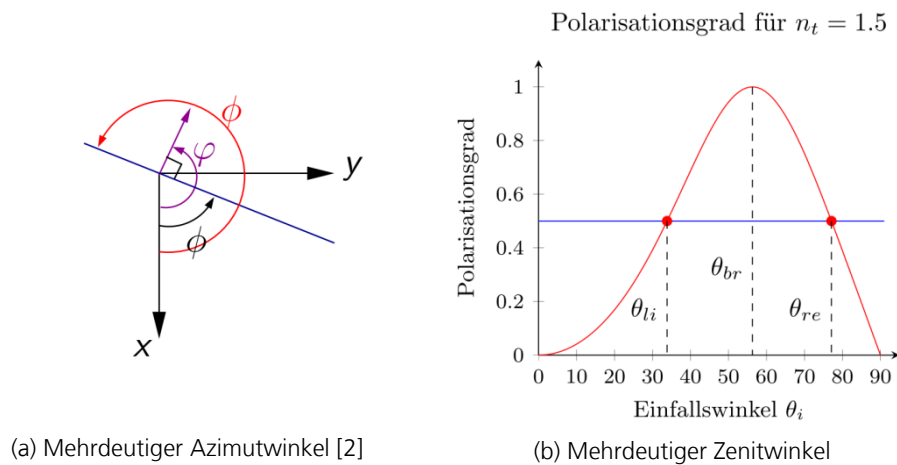


Abb. 1 Mehrdeutigkeiten der Winkel bei Bestimmung aus den Polarisationsparametern

Bestimmung der Flächennormalen

Wird von einer kontinuierlichen Oberfläche $f(x,y)=z$ ausgegangen, so ergibt sich für die Flächennormalen folgende Gleichung

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -f_x(x,y) \\ -f_y(x,y) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan\theta_r \cos\phi \\ \tan\theta_r \sin\phi \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Diese Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen Flächennormalen \vec{n} , Gradientenfeldern $f_x(x,y)$, $f_y(x,y)$ und Zenit- und Azimutwinkeln θ_r , ϕ dar. Da die Flächennormale zusammen mit dem einfallenden Lichtstrahl die Einfallsebene aufspannen, unterscheiden sich Polarisationswinkel φ und Azimutwinkel ϕ , wie in Abb. 1 illustriert, um 90° . Es lässt sich folgende Abhängigkeit formulieren: $\varphi = \phi \pm 90^\circ$, d.h. für einen Polarisationswinkel φ existieren zwei mögliche Azimutwinkel ϕ der in Einfallsebene liegenden Flächennormale (vgl. Abb. 1). Ähnlich wie der Azimutwinkel lässt sich auch der Zenitwinkel aus der Polarisationsmerkmalen von reflektierten Strahlen berechnen. Bei bekanntem Brechungsindex n_t ergibt sich für den spiegelnden Polarisationsgrad

$$\rho(\theta_r, n_t) = \frac{2\sin^2\theta_r \sqrt{n_t^2 - \sin^2\theta_r - n_t^2 \sin^2\theta_r + \sin^4\theta_r}}{n_t^2 - \sin^2\theta_r - n_t^2 \sin^2\theta_r + 2\sin^4\theta_r} \quad (2)$$

Anhand des Verlaufs des Polarisationsgrades für einen Brechungsindex von z.B. $n_t = 1,5$ in Abb.

1 ist ersichtlich, dass es für einen Polarisationsgrad ρ zwei mögliche Zenitwinkel bzw. Einfallswinkel θ_{li} und θ_{re} gibt. Ausgenommen ist der Zustand der vollständigen Polarisation mit $\rho=1$ beim Brewsterwinkel θ_{br} .

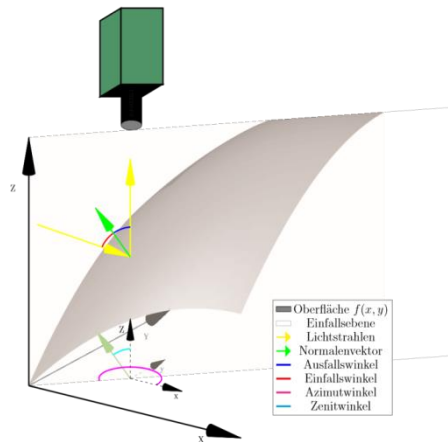


Abb. 2 Schematische Aufnahme einer spiegelnden Reflexion an einer kontinuierlichen Oberfläche $f(x, y)$ und die Lage der dazugehörigen Flächennormale. Der Einfallswinkel und die Flächennormale spannen die Einfallsebene auf. Zur Übersicht über die zu berechnenden Azimut- und Zenitwinkel, die die Flächennormale eindeutig bestimmen, wurde der Normalenvektor auf die Ebene $z=0$ unter die Oberfläche projiziert.

Die eigentliche Rekonstruktion der 3D-Oberfläche wird in Anhang A beschrieben.

Aufnahmetechnik

Für die Aufnahme der Bilder wurde eine Polarisationskamera („POLKA“, Fraunhofer IIS [5]) genutzt, mit der die Polarisationsinformationen durch eine einzige Aufnahme erfasst werden kann. Bedingt durch die Empfindlichkeit dieser Kamera wird für die Messungen an Prüfkörpern ein Ring mit Infrarot-LEDs (ca. 850 nm) verwendet. Zur Erzeugung einer diffusen, homogenen Beleuchtung wurde ein Beleuchtungsdom wie in Abb. 3 eingesetzt.

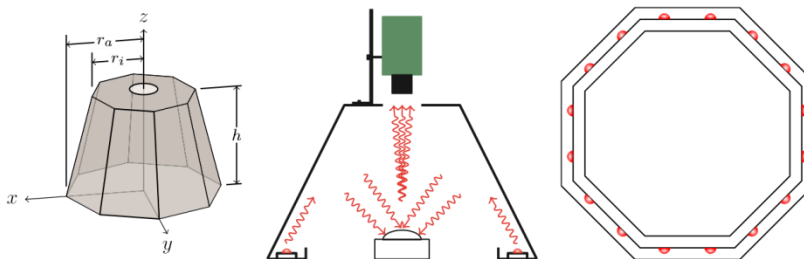


Abb. 3 Prinzip der diffusen Dombeleuchtung

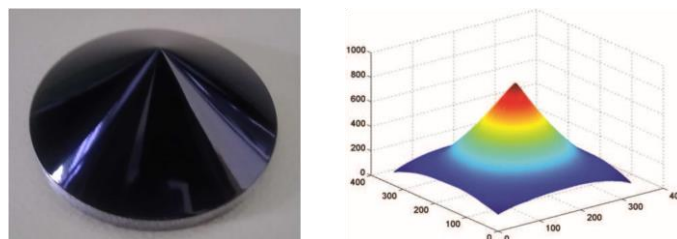


Abb. 4 Rekonstruktion eines kegelförmigen Prüfkörpers

Die Literaturangaben befinden sich im Anhang A.

Sensorkenngrößen					
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper	
Gerätebeschreibung					
1.1	Abmessungen (BxHxT)	-	mm ³		
1.2	Gewicht	-	g		
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	-	nm		
1.4	elektrische Leistung	-	W		
1.5	Versorgung	-	V/A/bar		
1.6	Art der Versorgung	-	(text)		
1.7	IP Schutzklasse	-	(text)		
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	-	(text)		
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	-	€		
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Ethernet	(text)		
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	-	(text)		
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	Intensität	(text)		
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)		
Funktionsbeschreibung					
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)		
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)		
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl		
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}		
2.5	typische Einsatzfelder	Vermessung von stark reflektierenden/spiegelnden Oberflächen	(text)		
Messtechnische Kenngrößen 3D					
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	130x100x85	mm ³		
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	215	mm		
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	- / -	mm		
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	-	mm		
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm		
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	-	mm		
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	-	mm		
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	-	mm		
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	291840	pt		
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	-	Grad		
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-	mm		
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	-	Grad		
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	- / -	mm		
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen					
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹		
Zeitbezogene Kenngrößen 3D					
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	-	ms		
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	-	ms		
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	-	ms		
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	-	px/s		
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	-	fps		
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	-	fps		
Technische Daten eines elementaren Bildgebers					
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	POL02T	(text)		
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / (x,y)	(text)		
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	408x680	px		

Nr.	Kenngroße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	-	ms	
	Rate elementare Einzelaufnahme	100	fps	
	Pixelrate	-	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	-	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	-	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	-	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	-	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten		(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors		(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF		(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme		h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	-			

Anhang A

„Frankot-Chellappa“-Algorithmus

Um aus einem Vektorfeld, wie dem Gradientenfeld $G(x,y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \quad 0 \right)$ eine skalare Funktion $z = f(x,y)$ zu erhalten muss es konservativ sein. D.h. das Integral über einen geschlossenen Pfad muss Null ergeben und darf nicht vom Integrationsweg abhängen. Es gilt $rot G(x,y) = 0 \Leftrightarrow \nabla f = G(x,y)$, was wiederum zur

Integrabilitätsbedingung $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = 0$ führt. In der Praxis erfüllen gewonnene Gradientendaten diese

Bedingung meist nicht und erweisen sich als nicht integrierbar. Mit den rekonstruierten Gradientenfeldern p und q , die man aus den Polarisationsmerkmalen über das Feld an Flächennormalen gewinnt, stellt man folgendes Optimierungsproblem bzw. das Funktional auf:

$$W = \iint \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x} - p \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} - q \right)^2 \right) dx dy \quad (3)$$

Dieses Fehlerfunktional wird minimiert, um Gradienten $\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)$ zu finden, die integrierbar sind und die

kleinste Abweichung zu den gemessenen Gradienten p, q aufweisen. Frankot und Chellappa [3] führen für dieses Problem die entsprechenden Fouriertransformationen durch und minimieren so das Funktional für die Gradientenfelder p und q . Durch die inverse Fouriertransformation erhält man dann die Oberfläche über implizite Integration

$$f(x,y) = F^{-1} \left\{ \frac{-ju\bar{P}(u,v) - jv\bar{Q}(u,v)}{u^2 + v^2} \right\} \quad (4),$$

wobei $P(u,v)$ und $Q(u,v)$ die Fouriertransformierten der Gradientenfelder symbolisieren. Die obige Lösungsweg schafft es dabei nicht den Mittelwert $F(0,0)$ für $z = f(x,y)$ zu rekonstruieren.

„Shape-from-Shapelets“-Algorithmus

Frankot und Chellappa [3] erreichen durch Projektion der Oberflächengradienten auf die integrierbaren, nicht redundanten Fourier- Basisfunktionen die Rekonstruktion beim „Shape-from-Shading“. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine redundante Menge von nicht orthogonalen, endlichen Basisfunktionen, so genannten Shapelets (meist 2D-Gauß-Filter) zu wählen [4]. Die Idee dahinter ist es, nicht die Gradienten zu verarbeiten, sondern durch die Messung und Summation der Korrelation zwischen den Werten für Azimut- und Zenitwinkel der unterschiedlich skalierten Shapelets und den gemessenen Winkeldaten des zu rekonstruierenden Objekts, die implizite Integration der Oberfläche zu bewerkstelligen (siehe Abb. 4). Da die Ableitung linear ist, stellt die Korrelation zwischen Gradienten des Objekts und der Basisfunktionen ein, bis auf eine Skalierung, äquivalentes Maß zur direkten Korrelation zwischen den Signalen dar. Aus

$C_{\nabla_i} = |\nabla_m| * |\nabla_{s,i}|$ ergibt sich die Korrelation für die Zenitwinkel, wobei $|\nabla_{s,i}|$ und $|\nabla_m|$ den Betrag des Gradienten des Objekts und der Basisfunktion in Skalierung i darstellt, der sich über $|\nabla_m| = \tan \theta_r$ herleiten

lasst. Der Vergleich der Azimutwinkel von Objekt und skaliertem Shapelet wird anhand von $C_{\phi_i} = \cos(\phi_m - \phi_{s,i})$ gemessen und fließt in die komplette Korrelation $C_i = C_{\nabla_i} \cdot C_{\phi_i}$ mit ein. Dies führt letztendlich zur vollständigen Rekonstruktion durch Summierung über mehrere Skalierungen i zu

$$f(x,y) = \sum_i C_i = \sum_i C_{\nabla_i} \cdot C_{\phi_i} = \sum_i |\nabla_m| * |\nabla_{s,i}| \cdot \cos(\phi_m - \phi_{s,i}) \quad (3)$$

Literatur

- [1] Wolff LB, Andreou AG. Polarization camera sensors. Image Vis Comput. 1995;13(6):497–510.
- [2] Morel O, Ferraton M, Stolz C, Gorria P. Active Lighting Applied to Shape from Polarization. In: Int Conf Image Proc; 2006. p. 2181–2184.

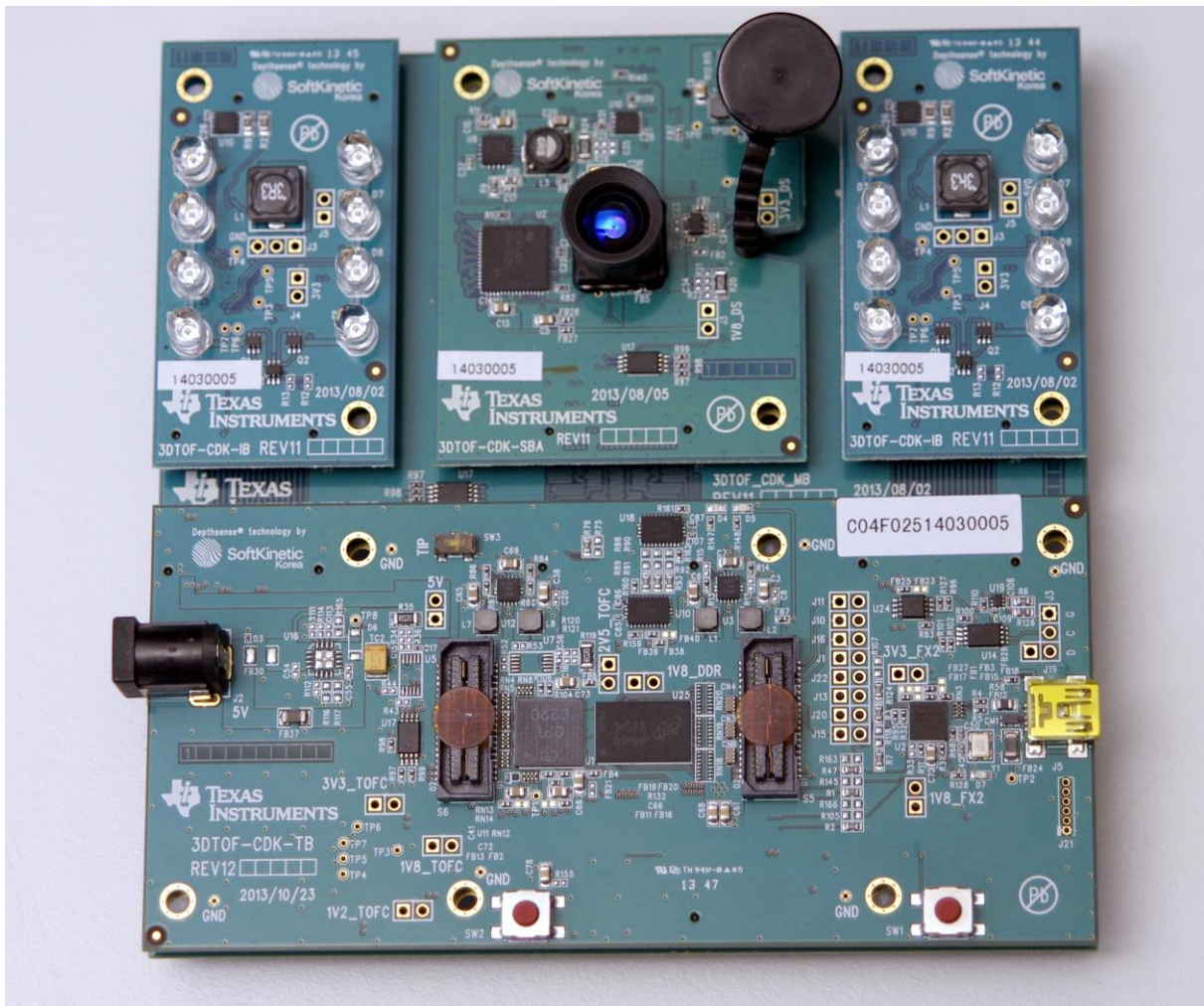
- [3] Frankot RT, Chellappa R, Member S. A Method for enforcing integrability in shapefrom shading algorithms. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 1988;10:439–451.
- [4] Kovesi P. Shapelets correlated with surface normals produce surfaces. In: IEEEInt Conf Comput Vis; 2005. p. 994–1001.
- [5] Ernst J, Schmoz S, Zink J. Unbekanntes Effekt genutzt. QZ. 2014;59(2):10–13.


Sensordatenblatt

#6

Time-of-Flight Evaluierungsboard

Firma / Institution	Texas Instruments
Sensorfamilie / Modell	Evaluierungsplattform
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung, aktiv, Laufzeitbasiert
Verfahrens-Präzisierung	Entfernungsbestimmung durch Messung der Phasenverschiebung eines modulierten Infrarot-Lichtsignals



Adresse	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Am Wolfsmantel 33 91058 Erlangen	 Fraunhofer IIS
Telefon	+49 9131 776-0	
Email	movingpictures@iis.fraunhofer.de	
www	http://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/bsy/tech/lichtfeld.html	

Ausführliche Beschreibung

Hintergrund

Laufzeitbasierte Entfernungsmesssysteme senden einen elektromagnetischen Impuls aus und messen mit einem geeigneten Verfahren die Zeit, bis der von einem Objekt reflektierte Impuls beim wieder am Ausgangspunkt ankommt. Das bekannteste Laufzeitverfahren ist das RADAR.

Das hier verwendete Time-of-Flight-System verwendet infrarotes Licht (850nm), das mit einer Frequenz von 20MHz amplitudenmoduliert ist. Anstelle einer aufwändigen direkten Zeitmessung wird die Phasendifferenz (bzgl. der Modulationsfrequenz) zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal ermittelt und daraus rechnerisch die Entfernung des Reflexionspunktes abgeleitet. Die Momentanwertmessung erfolgt in einem Pixelarray mit QVGA-Auflösung. Da jeder Pixel eine Phaseninformation liefert, generiert das System eine Tiefenkarte der betrachteten Szene mit einer Auflösung von 320*240 Punkten.

Bedingt durch das Prinzip der Phasenmessung gibt es bei dieser Art der Time-of-Flight-Entfernungsmessung einen Eindeutigkeitsbereich, der von der Modulationsfrequenz abhängt und im vorliegenden Beispiel bei 7500mm liegt. Weiter entfernten Objekten kann keine eindeutige Entfernung zugeordnet werden. Durch Vergrößerung der Modulationswellenlänge kann der Eindeutigkeitsbereich erweitert werden, wodurch jedoch die Genauigkeit sinkt.

Bedingt durch eine Reihe systematischer und physikalischer Effekte ist die Entfernungsauflösung auf minimal ca. 1cm begrenzt. Lokale Unterschiede in der Lufttemperatur wirken sich z.B. auf die Lichtgeschwindigkeit aus, was signifikante Messfehler verursacht, zudem haben ToF-Sensoren grundsätzlich ein relativ schlechtes SNR. Weiterhin gibt es einen von der infraroten Objekthelligkeit abhängigen Messfehler. Im Gegensatz zu anderen Verfahren haben ToF-Systeme jedoch eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht.

Grundprinzip der ToF-Entfernungsmessung

Prinzipiell wird zwischen dem gesendeten und empfangenen phasenverschobenen Signal eine Kreuzkorrelationsfunktion berechnet. Dies geschieht implizit in den Pixeln des ToF-Sensors, die im Vergleich zu herkömmlichen Sensoren eine spezielle Architektur besitzen. Um aus der Korrelationsfunktion die Phasenverschiebung zu erhalten, muss diese bei mehreren (im Allgemeinen 4) verschiedenen Phasenwinkeln (0°, 90°, 180°, 270°) ausgewertet werden. Am Ausgang des Sensor-ADC stehen dann pro Pixel vier digitale Werte U_0 , U_{90} , U_{180} , U_{270} bereit, die jeweils zum Wert der Korrelationsfunktion bei den vier Phasenwinkeln proportional sind. Die Phasendifferenz ergibt sich dann zu

$$\phi = \arctan \frac{U_{90} - U_{270}}{U_0 - U_{180}}$$

und die Entfernung d

$$d = C \cdot f_{\text{mod}} \cdot \frac{\phi}{4\pi}$$

mit der Lichtgeschwindigkeit C und der Modulationsfrequenz f_{mod} .

Eine Herleitung der Korrelationsfunktion und eine Beschreibung der Architektur der ToF-Pixelzelle findet sich in [1]. Die systematischen und nicht-systematischen Fehler des ToF-Verfahrens werden in [2] näher beschrieben, ebenso wie geeignete Maßnahmen zur Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches und zur Kalibrierung.

Aufbereitung der ToF-Daten

Das verwendete ToF-Evaluierungssystem von Texas Instruments enthält neben dem ToF-Sensor auch die Infrarot-Beleuchtung und einen Controller, der den Sensor und die Beleuchtungseinheit steuert und aus den Sensorrohdaten nach obigen Gleichungen eine Entfernungsinformation berechnet.

Um zuverlässige Tiefeninformationen zu erhalten, müssen die Daten des Moduls jedoch noch aufbereitet werden. Diese Aufbereitung umfasst mindestens die folgenden Funktionen:

- Rauschreduktion durch Mittelung mehrerer ToF-Punktwolken. Dies ist das einfachste Verfahren zur Rauschreduktion bei statischen Szenen.
- Korrektur der geometrischen Verzerrung. Objekte am Rand des Bildfeldes haben prinzipbedingt einen größeren Abstand zum Sensor. Bei der Umrechnung in das Koordinatensystem der Punktwolke muss dies berücksichtigt werden, sonst erscheint die Punktwolke verzerrt.
- Auswertung der Signalamplitude. Mehrfachreflexionen oder Reflexionen weit entfernter Objekte außerhalb des Eindeutigkeitsbereiches liefern falsche Messwerte. Diese Messpunkte haben im Allgemeinen eine signifikant kleinere Signalamplitude und können auf diese Weise mit einer gewissen Zuverlässigkeit identifiziert werden.

Beispielaufnahme

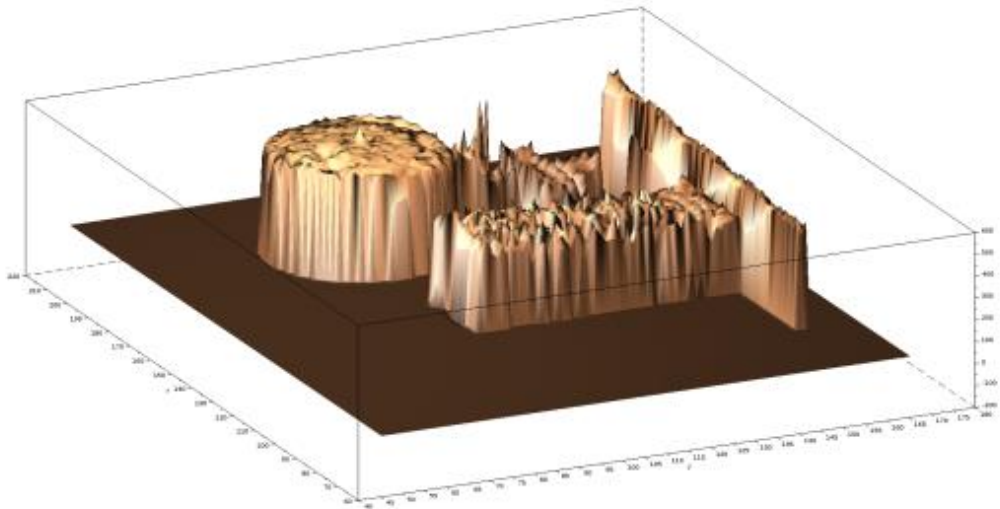


Abbildung 1: Beispielaufnahme einer Kugel (links hinten) und eines Zylinders (rechts vorne). Da der Zylinder im Original eine kontraststarke schwarz-weiße Oberflächentextur hat, ist seine Krümmung bedingt durch den systematischen Messfehler kaum zu erkennen. Die Skalierung des Modells in der Z-Achse ist zudem nicht maßstabsgetreu. Alle Messwerte mit einer zu geringen Signalamplitude wurde auf einen „Sealevel“ gelegt, wobei ein sinnvoller Schwellwert experimentell ermittelt wurde.

Literatur

[1] Pancheri, L. und Stoppa, D.: Sensors Based on In-Pixel Photo-Mixing Devices, in Remondino, F., Stoppa, D. (Hrsg): TOF Range Imaging Cameras, Springer Verlag, 2013, DOI 10.1007/978-3-642-27523-4

[2] Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R.: Time-of-Flight Cameras. Principles, Methods, and Applications, Springer Verlag, 2031, DOI 10.1007/978-1-4471-4658-2

Sensordatenblatt

#7

Clusteraugenkamera eCLAY 720p

Firma / Institution	Fraunhofer IOF
Sensorfamilie / Modell	eCLAY 720p
Verfahrens-Einordnung	<i>optische 3D Vermessung → Triangulation → passiv → Stereo/Photogrammetrie → multiokular</i>
Verfahrens-Präzisierung	<i>Passives Multiview-Stereo mittels block matching</i>

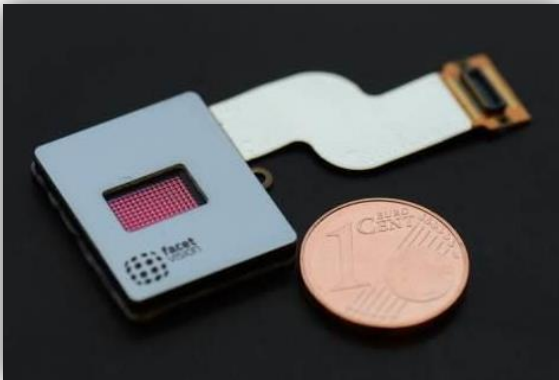


Abbildung 1: eCLAY 720p mit MT9F002 CIS.

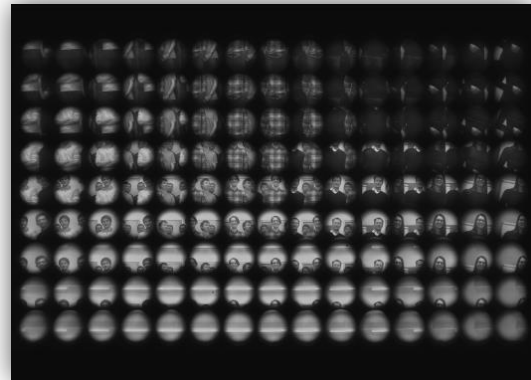


Abbildung 2: Detailansicht des Master-Wafer mit hunderten MLAs.

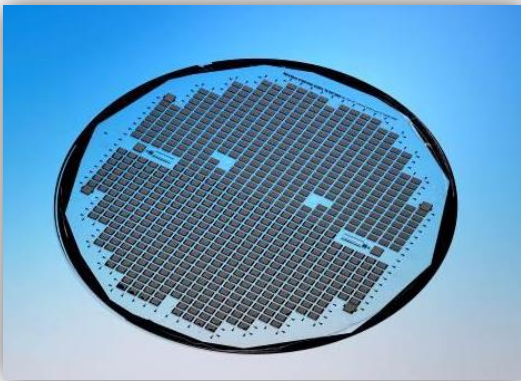



Abbildung 3: Photo eines 8'' Wafers nach doppelseitiger UV-Replikation.



Abbildung 4: Ansicht von mehreren Prototypen der Pilotserie.

Adresse	Fraunhofer IOF Albert-Einstein-Straße 7 07745, Jena	
Telefon	+49 371807437	
E-Mail	Frank.Wippermann@iof.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/3DM	

Ausführliche Beschreibung

Allgemeine stereophotogrammetrische Methode

Der vorgestellte Sensor arbeitet zur Bestimmung eines 3D-Messwertes nach dem Triangulationsprinzip, siehe Abbildung 5. Trianguliert wird zwischen den zwei Kamerazentren C_1, C_2 und dem Objektpunkt A , vgl. Abbildung 6. Die C_1, C_2 verbindende Linie wird als *baseline* bezeichnet und ist eine Seite des gesuchten Dreiecks der Triangulation. Ist die relative Lage von C_1, C_2 unveränderlich, kann diese in einem vorgelagerten Prozess, der sogenannten Kalibrierung, einmalig bestimmt werden. Danach wird sie als bekannt vorausgesetzt. Die beiden anderen Schenkel des Dreiecks ergeben sich durch die Fortführung der Verbindungslinie (Bildpunktstrahl) von Kamerazentrum C_1 bzw. C_2 zum Objektpunkt A , vgl. Abbildung 6. Die Abbildung a'_n von A auf den Sensorchip I_n sei der Bildpunkt von A im Kamerasystem von C_1, C_2 . Da die Positionen der a'_n auf den Sensorchips i. d. R. nicht übereinstimmen müssen zugehörige Bildpunkte in den Kamerabildern identifiziert werden. Sind diese gefunden, kann die Triangulation durchgeführt und die Koordinate von A berechnet werden.

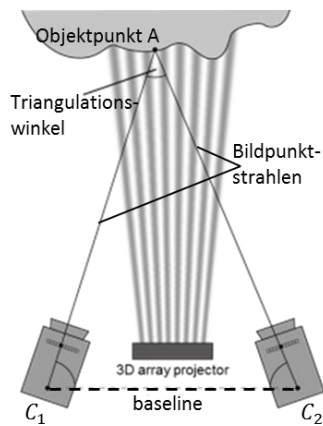


Abbildung 5: Stereo-Triangulation mit aktiver Musterprojektion

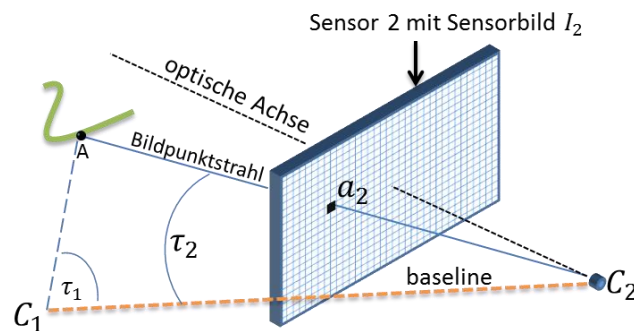


Abbildung 6: Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 5. Bestimmung des Triangulationswinkels τ_2 zwischen der baseline und dem Projektionszentrum C_2 von Kamera 2. „ a “ ist der Bildpunkt des Objektpunktes „ A “ auf dem Kamerasensor.

Multi-Aperturkamera - eCLAY 720p

Das Abbildungsprinzip der Multi-Aperturkamera (Clusteraugenkamera) ist in **Abbildung 7** dargestellt. Im Falle der eCLAY 720p wird ein doppelseitiges Optikmodul aus 15 x 9 optischen Kanälen über dem Sensor-Chip montiert. Jeder einzelne dieser 15 x 9 Kanäle besitzt ein annäherndes FOV von $\sim 13^\circ$ im Durchmesser mit einer fokalen Länge von 1,25 mm.

Das Sensormodul besteht aus einem eigens entwickelten FPGA Board zur Ansteuerung des Sensor-Chips und zum Datentransfer via USB 2.0 Schnittstelle. Der eCLAY 720p ist in den folgenden Sensorversionen entwickelt worden:

- OnSemi Aptina MT9F002: 14MP CIS, 1/2.3-inch, 1.4 μ m pixel pitch, monochrome and RGB-version,
- OnSemi Aptina AR0330CS: 3.4MP CIS, 1/3-inch, 2.2 μ m pixel pitch, RGB-Version .

Letzterer wurde für das Testen des Produktionsverfahrens in den Pilotserien verwendet. Für die eigentliche Evaluation kam der MT9F002, aufgrund der besseren Bildqualität, zum Einsatz. Die so realisierten Parameter als „2D-Kameramodul“ sind der **Tabelle 1** zu entnehmen.

Tabelle 1: Parameter der 2D-Funktionalität des eCLAY 720p.

Parameter	diag. FOV	F-Nr.	finale Bild-format	TTL	Nr. Kanäle	Bild-Ø eines Kanals	diag. FOV eines Kanals	max. CRA	Pixel-größe
Wert	70°	2.8	1280 x 720	1.9 mm	15 x 9	300 µm	~13°	26°	2.2 µm

Passives Stereovision mit dem CLAY 720p

Allgemein nutzen passive Stereoprinzipien die dem Objekt eigene Textur, um gleiche Punkte oder Bildsegmente in unterschiedlichen Sensorbildern I_n zu identifizieren. Diese können dann für die zuvor beschriebene Triangulation genutzt werden. Für eine dichte Tiefenrekonstruktion ist es notwendig, für möglichst alle Punkte in einem Sensorbild korrespondierende Punkte in einem anderen Sensorbild zu finden.

In [2] wurde gezeigt, dass die Kanäle des eCLAY 720p für eine Stereorekonstruktion (passiv Triangulation) verwendet werden können. Hier sind jedoch enge Grenzen gesetzt, wie **Abbildung 8** zeigt. Gründe dafür sind zum einen die sehr kleine Stereobasis zwischen benachbarten Kanälen. Des Weiteren besitzen die einzelnen Kanäle, relativ gesehen, eine geringe Auflösung und nur wenige Überlappungen in den Sensorkanal-Bildern, was die eindeutige Identifikation/Merkmalsgewinnung ein- und desselben Objektpunktes in unterschiedlichen Kanälen erschwert. Es ist daher eher von einer Tiefendiskriminierung zu sprechen, die bei jetzigem Design nach einem Meter endet, vgl. **Abbildung 8**.

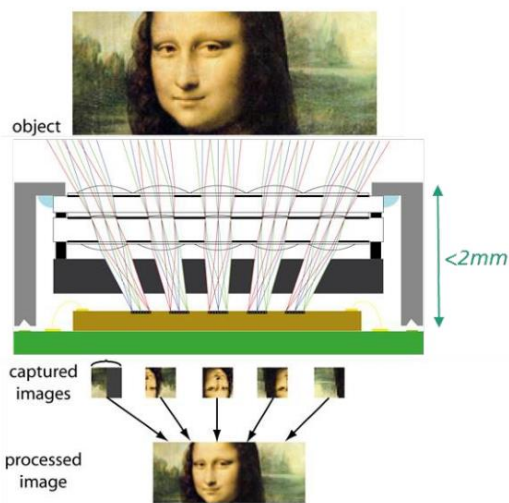


Abbildung 7: Abbildungsprinzip der Klusteraugenkamera.

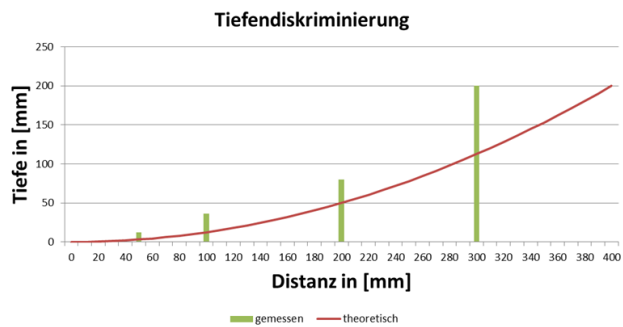


Abbildung 8: Berechnete und gemessene Tiefendiskriminierung.

Referenzen:

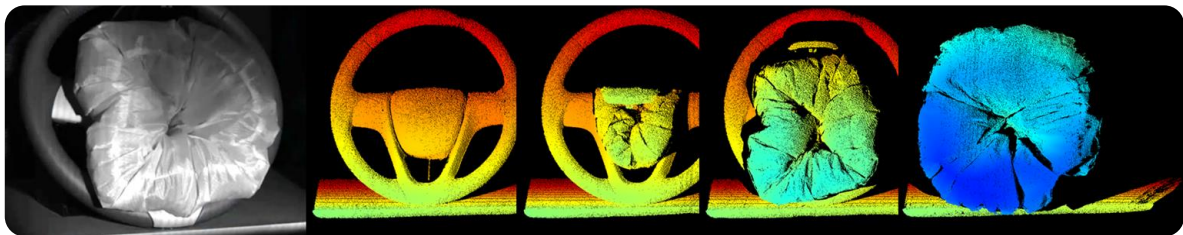
- [1] Brückner, Andreas, Alexander Oberdörster, Jens Dunkel, Andreas Reimann, und Frank Wippermann. 2016. „Ultra-slim 2D- and depth-imaging camera modules for mobile imaging“. In , herausgegeben von Wibool Piyawattanametha und Yong-Hwa Park, 97600N.
- [2] Brückner, A., Oberdörster, A., Dunkel, J., Reimann, A., Müller, M., and Wippermann, F.C., "Ultra-thin wafer-level camera with 720p resolution using micro-optics," Proc. SPIE 9193, 91930W (2014).


Sensordatenblatt

#8

GOBO *high-speed*

Firma / Institution	Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik
Sensorfamilie / Modell	GOBO-Sensor / GOBO <i>high-speed</i>
Verfahrens-Einordnung	<i>optische 3D Vermessung</i> → Triangulation → aktiv → <i>Projektion</i> → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives, binokulares Spacetime-Stereo



Adresse	Fraunhofer IOF Albert-Einstein-Straße 7 07745, Jena	
Telefon	+49 371807206	
Email	Peter.Kuehmstedt@iof.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/3DM	

Ausführliche Beschreibung

Das Messprinzip und dessen Umsetzung

Alle Sensoren der Gobo-Familie arbeiten nach dem Prinzip des aktiven *spacetime-Stereo*. D. h. die Informationen aus zwei (allgemein n) Kamerabildern werden über zeitliche und lokal begrenzt räumliche Informationen korreliert. Die zeitliche Information wird hierzu aktiv durch eine Lichtquelle (Projektor) ins System gebracht. **Abbildung 1** (a) zeigt den schematischen Aufbau des Projektors. Die Modulation der Beleuchtungsintensität I und damit die Mustererzeugung erfolgt durch die Rotation des Gobos (Graphical optical black out) vor der Lichtquelle, **Abbildung 1** (b).

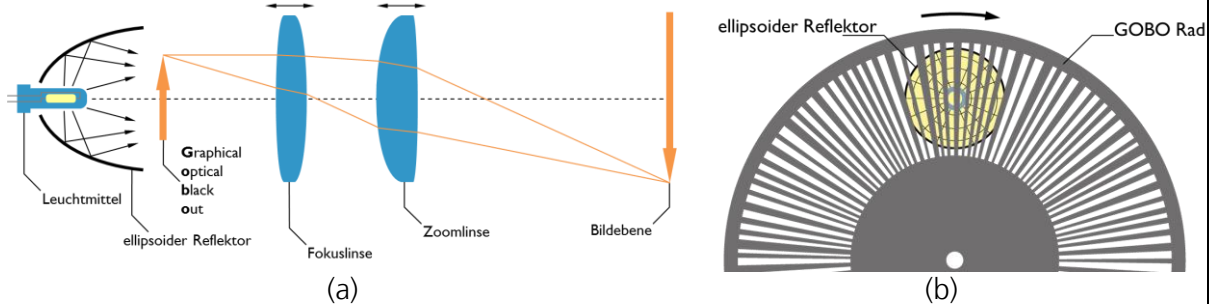


Abbildung 1: Projektionsprinzip der Gobo-Sensoren
 (a) Abbildungsweg in der Projectoreinheit (b) Gobo-Rad zur Mustererzeugung

Um einen Objektpunkt mittels des Muster gut von seinen Nachbarn zu unterscheiden, muss (I) die Mustergenerierung optimal mit der Aufnahmesteuerung der Kameras abgestimmt werden und (II) die erzeugten Muster räumlich und zeitlich innerhalb der Umgebung eines Messpunktes genügend variieren. Letzteres wird durch die Verwendung *aperiodischer sinusoidaler Streifenmuster* (1) realisiert.

$$I_i^{proj}(x, y) = a_i(x) + b_i(x) \sin[c_i(x) x + d_i(x)] \quad (1)$$

Sie entstehen bei der Projektion von Streifenmustern des Gobo-Rads in Kombination mit Bewegungsunschärfe und Defokussierung, siehe **Abbildung 2** (a)+(b). Betrachtet man die Intensitäten I_i in einem Punkt über eine Bildsequenz ergibt sich ein Kode nach I_i^{proj} , vgl. **Abbildung 2** (c).

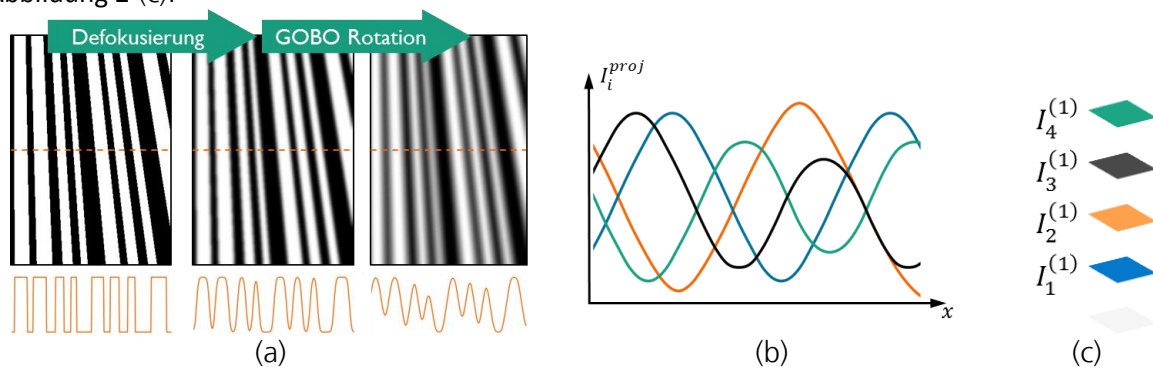


Abbildung 2: Prinzip der Mustergenerierung bei Gobo-Sensoren
 (a) Erzeugung von Sinusintensitäten aus Streifen (b) Überlagerung aperiodischer Sinusmuster
 (c) Resultierende Mustersequenz/Kode eines Punktes aus vier Intensitäten (vier Kamerabildern)

Um ein und denselben (*Bild*-)Punkt $I^{(1)}$ in allen Kameras k des Sensors zu identifizieren, werden die Intensitätsfolgen für alle Bildpunkte in allen Kameras mittels der normalisierten Kreuzkorrelation (2) mit dem zu identifizierenden Punkt verglichen.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N [I_i^{(1)} - \bar{I}^{(1)}] [I_i^{(k)} - \bar{I}^{(k)}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [I_i^{(1)} - \bar{I}^{(1)}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [I_i^{(k)} - \bar{I}^{(k)}]^2}} \quad (2)$$

Messsystem *high-speed-Gobo*

Das Messsystem *high-speed-Gobo* der Sensorfamilie „Gobo-Sensor“ ist auf höchste Messgeschwindigkeiten ausgelegt (siehe auch Kenngrößen 5.1 und 7.1). Dies schafft die Möglichkeit, schnelle Deformations- bzw. Umformungsprozesse für Festigkeitsanalysen oder Optimierung von FEM-Modellen mit einem dichten Netz an 3D-Messpunkten zu unterstützen. Anwendungen solcher Prozesse sind z. B. Crashtests, Implosionen oder Explosionen etc. Um dies zu ermöglichen erfolgt zuerst die vollständige Messung des zu erfassenden Vorgangs und im Anschluss die Auswertung der Messdaten. Der Grundaufbau folgt einer Kamera-Projektor-Kamera Anordnung, wobei die eingesetzten Kameras die Systemgeschwindigkeiten bzw. die erreichbaren Messzeiten bestimmen. Für die Evaluation wurde das System mit zwei High-speed-Kameras vom Typ *Photron FASTCAM SA-X2* bestückt. Die max. 2D-Messrate beträgt im Sensoraufbau 50 kHz bei 0,2Mpx und bei der voller Auflösung von 1 Mpx ca. 12,5kHz. Aus der max. 2D-Messrate ergibt sich auch die max. erreichbare 3D-Messrate (Kenngröße 5.5), sie liegt entsprechend bei ca. 50.000 fps bzw. 3D-Punktewolken-pro-Sekunde.

Mit einer Beleuchtungsstärke von 30.000 lx können Messfelder von 500 x 500 mm^2 bis einige m^2 realisiert werden (siehe Anwendungsbeispiele, unten). Im Vergleich zu anderen Hochgeschwindigkeitsmesssystemen müssen dazu weder zusätzliche Marken positioniert noch besondere Arbeitsschutzmaßnahmen beachtet werden.

Beispielapplikationen

Die hohe Beleuchtungsstärke (30 klx) des Systems kann sehr flexibel eingesetzt werden. Sie ermöglicht sowohl extrem kleine Belichtungszeiten der Kameras als auch die Ausleuchtung sehr großer Messfelder. Ersteres ist insbesondere für schnell ablaufende Prozesse notwendig. So konnte der *high-speed-Gobo* bereits erfolgreich bei der Deformationsanalyse von Auto-Crashtests eingesetzt werden, siehe Titelseite. Auch die Kinesiologie, die Bewegungsanalyse am Menschen, profitiert von den hohen 3D-Messraten. Beispiele hierfür sind die 3D-Bewegungsverfolgung beim Seilspringen **Abbildung 3 (a)** oder die Deformation/Belastung beim Treten eines Fußballs (**Abbildung 3 (b)**).

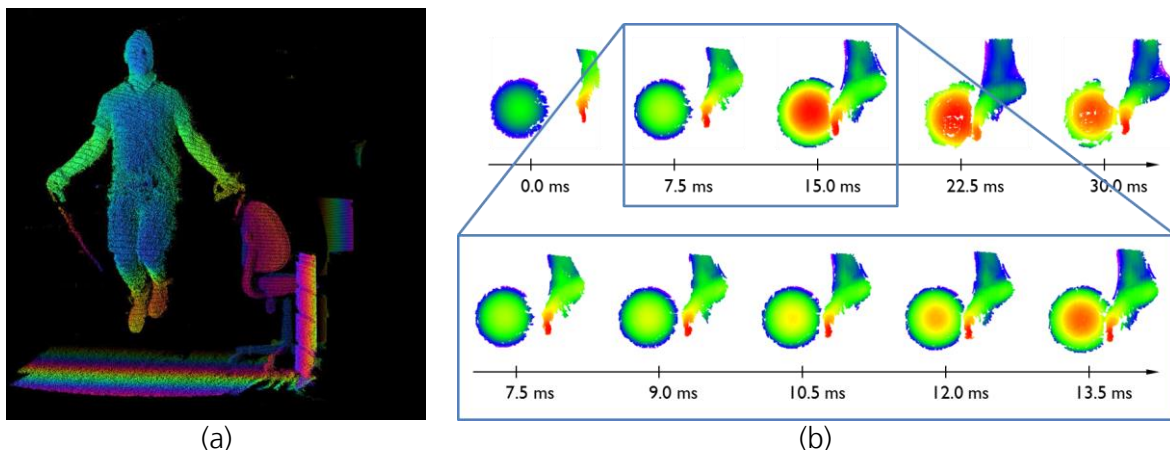


Abbildung 3: Beispielapplikation des *high-speed* Gobosensor

(a) 3D-Messung eines Seilspringers in Bewegung (b) Fußdeformation beim Tritt gegen einen Fußball

Relevante Veröffentlichungen

Heist, Stefan ; Lutzke, Peter ; Schmidt, Ingo ; Dietrich, Patrick ; Kühmstedt, Peter ; Tünnermann, Andreas ; Notni, Gunther: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection. In: Optics and Lasers in Engineering Bd. 87 (2016), S. 90–96

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	1150x2450x120	mm ³	
1.2	Gewicht	40000	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	600 ± 200	nm	
1.4	elektrische Leistung	1200	W	
1.5	Versorgung	230V (AC)	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom, Schuko	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	a. A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	GigE (RJ-45)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	ASC, XYZ, PLY	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	x, y, z, t (Zeit)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	2D-Matrix (Zeile Spalte)	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D-Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	-	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Bewegung und bewegte Objekte, Deformation: Crash Test, Airbag, Sportmedizin	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	700x880x2000	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	800	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	2,98 / 0,36	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	1,25	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	3,80	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,059	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_λ)	0,0069	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	997796	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 34,5	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 496	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	59	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktstand (x / y)	0,81 / 0,81	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	0,64	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	60	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	60,64	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	12500 · 10 ⁶	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	12500	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	14	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	Photron FASTCAM SA-X2	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2-D Matrix	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1024x1024	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,080	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	12.500	fps	
7.3	Pixelrate	13.107.200.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	-	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0 – 40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	-	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	flexible Konfiguration der Komponenten (Kamera, Muster, Leuchtmittel etc.)	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	-	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	1	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i7 @ 3.4Ghz / RAM: 16GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 SP1 / NET: 2x ASUS onboard Gigabit Ethernet mit Cat 5e Kabel / HDD: 256GB Samsung EVO 820			

Sensordatenblatt

#9

GOBO pic	
Firma / Institution	Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik
Sensorfamilie / Modell	GOBO-Sensor / GOBO pic
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives, binokulares Spacetime-Stereo



Abbildung 1: mini-Gobo bei aktiver Projektion

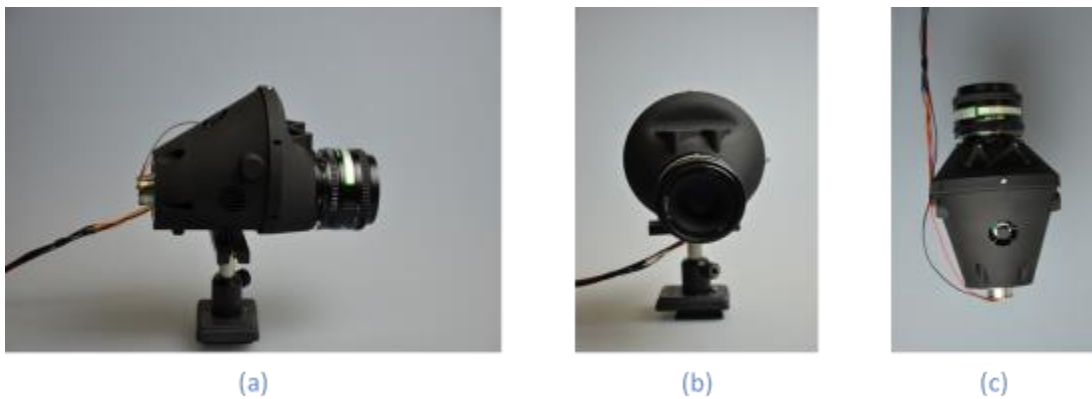



Abbildung 2: Verschiedene Ansichten der Projektionseinheit
(a) Seite (b) Front (c) Oben

Adresse	Fraunhofer IOF Albert-Einstein-Straße 7 07745, Jena	
Telefon	+49 371807206	
Email	Peter.Kuehmstedt@iof.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/3DM	

Ausführliche Beschreibung

Das Messprinzip und dessen Umsetzung

Alle Sensoren der Gobo-Familie arbeiten nach dem Prinzip des aktiven *spacetime-Stereo*. D. h. die Informationen aus zwei (allgem. n) Kamerabildern werden sowohl über räumliche als auch zeitliche Informationen korreliert. Die zeitliche Information wird hierzu aktiv durch eine Lichtquelle (Projektor) ins System gebracht. **Abbildung 3** (a) zeigt den schematischen Aufbau des Projektors. Die Modulation der Beleuchtungsintensität I und damit die Mustererzeugung erfolgt durch die Rotation des *Gobos* (Graphical optical black out) vor der Lichtquelle, **Abbildung 3** (b).

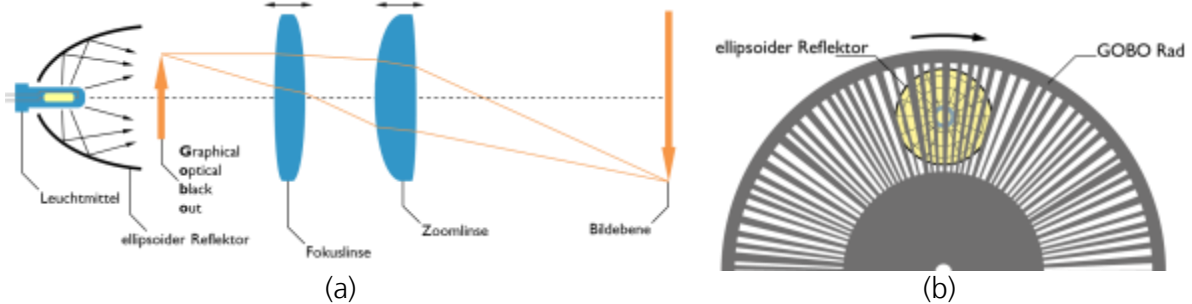


Abbildung 3: Projektionsprinzip der Gobo-Sensoren
 (a) Abbildungsweg in der Projektoreinheit (b) Gobo-Rad zur Mustererzeugung

Um die Entropie für einen so kodifizierten Punkt im Messfeld zu maximieren, muss (I) die Mustergenerierung optimal mit der Aufnahmesteuerung der Kameras abgestimmt werden und (II) die erzeugten Muster räumlich und zeitlich innerhalb der Umgebung eines Messpunktes genügend variieren. Letzteres wird durch die Verwendung *aperiodischer sinusoidaler Interferenzmuster* (1) gewährleistet.

$$I_i^{proj}(x, y) = a_i(x) + b_i(x) \sin[c_i(x) x + d_i(x)] \quad (1)$$

Sie entstehen bei der Projektion von Streifenmustern des Gobo-Rads in Kombination mit Bewegungsunschärfe und Defokussierung, siehe **Abbildung 4** (a)+(b).

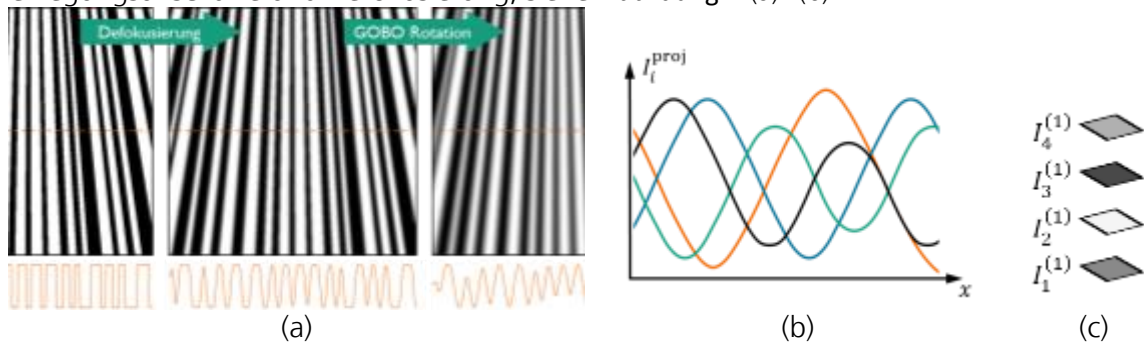


Abbildung 4: Prinzip der Mustergenerierung bei Gobo-Sensoren
 (a) Erzeugung von Sinusintensitäten aus Streifen (b) Überlagerung aperiodischer Sinusmuster
 (c) Resultierende Mustersequenz/Kode eines Punktes aus vier Intensitäten (vier Kamerabildern)

Betrachtet man die Intensitäten I_i in einem Punkt über eine Bildsequenz ergibt sich ein Kode für diesen Punkt, siehe **Abbildung 4** (c). Um ein und denselben (*Bild*-)Punkt $I^{(1)}$ in allen Kameras k des Sensors zu identifizieren, werden die Intensitätsfolgen für alle Bildpunkte in allen Kameras mittels der normalisierten Kreuzkorrelation (2) mit dem zu identifizierenden Punkt verglichen.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N [I_i^{(1)} - \bar{I}^{(1)}] [I_i^{(k)} - \bar{I}^{(k)}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [I_i^{(1)} - \bar{I}^{(1)}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [I_i^{(k)} - \bar{I}^{(k)}]^2}} \quad (2)$$

Relevante Veröffentlichungen

Heist, Stefan ; Lutzke, Peter ; Schmidt, Ingo ; Dietrich, Patrick ; Kühmstedt, Peter ; Tünnermann, Andreas ; Notni, Gunther: High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection. In: Optics and Lasers in Engineering Bd. 87 (2016), S. 90–96

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	350x360x170	mm ³	
1.2	Gewicht	3200	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	460 ± 20	nm	
1.4	elektrische Leistung	350	W	
1.5	Versorgung	230V (AC)	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	a. A. (konfig.-abhäng.)	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	2x GigE (RJ-45)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	C-API, Datei (ASC etc.)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	x, y, z(, Intensität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	2-D Matrix (Zeile Spalte)	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D-Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	-	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	preiswerter 3D-Scanner	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	290 x 294 x 277	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	790	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0.70 / 0.45	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.35	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	3.784	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0.073	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0.0033	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	966380	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 13	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 216	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	57	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktstand (x / y)	0,288 / 0,299	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	- / -	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	80	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	133	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	213	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	100 · 10 ⁶	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	100	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	4,7	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	IDT Vision NX-3	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2-D Matrix	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1024x1024	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	10	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	100	fps	
7.3	Pixelrate	$100 \cdot 10^6$	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	600	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0 ... 40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	-	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	-	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	-	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	1h	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i7 @ 3.4Ghz / RAM: 16GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 SP1 / NET: 2x ASUS onboard Gigabit Ethernet mit Cat 5e Kabel / HDD: 256GB Samsung EVO 820			

Sensordatenblatt

#10

Mobiler Handscanner

Firma / Institution	Fraunhofer IOF
Sensorfamilie / Modell	3D-Handscanner
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives, binokulares Triangulationsverfahren mit Lichtprojektion Korrespondenzsuche über Gray-Code und phasenverschobene Sinusmuster Farbmapping über kalibrierte Spiegelreflexkamera

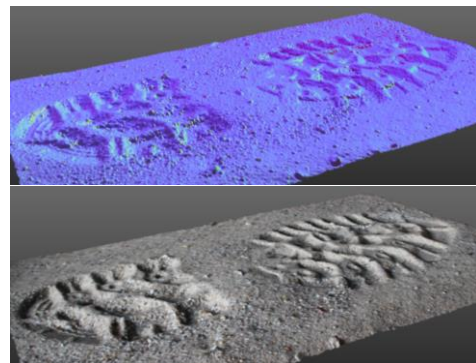



Abbildung 2: Scan einer Schuhspur (3D und mit Farbüberlagerung)



Abbildung 1: Sensorkopf



Abbildung 3: Aufnahme einer Schuhspur (links: Transportkoffer, mitte: handgehalten, rechts: stativgehalten mit Abschattungsbox)

Adresse	Optische Systeme – 3D-Messtechnik Fraunhofer IOF Albert-Einstein-Straße 7 07745 Jena	
Telefon	0049 3541 807-230	
Email	Peter.Kuehmstedt@iof.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/3DM	

Ausführliche Beschreibung

Allgemeine stereophotogrammetrische Methode

Der vorgestellte Sensor arbeitet zur Bestimmung eines 3D-Messwertes nach dem Triangulationsprinzip, siehe Abbildung 4. Trianguliert wird zwischen den zwei Kamerazentren C_1, C_2 und dem Objektpunkt A , vgl. Abbildung 5. Die C_1, C_2 verbindende Linie wird als *baseline* bezeichnet und ist eine Seite des gesuchten Dreiecks der Triangulation. Ist die relative Lage von C_1, C_2 unveränderlich, kann diese in einem vorgelagerten Prozess, der sogenannten Kalibrierung, einmalig bestimmt werden. Danach wird sie als bekannt vorausgesetzt. Die beiden anderen Schenkel des Dreiecks ergeben sich durch die Fortführung der Verbindungslinie (Bildpunktstrahl) von Kamerazentrum C_1 bzw. C_2 zum Objektpunkt A , vgl. Abbildung 5. Die Abbildung a'_n von A auf den Sensorchip I_n sei der Bildpunkt von A im Kamerasystem von C_1, C_2 . Da die Positionen der a'_n auf den Sensorchips i. d. R. nicht übereinstimmen müssen zugehörige Bildpunkte in den Kamerabildern identifiziert werden. Sind diese gefunden, kann die Triangulation durchgeführt und die Koordinaten von A berechnet werden.

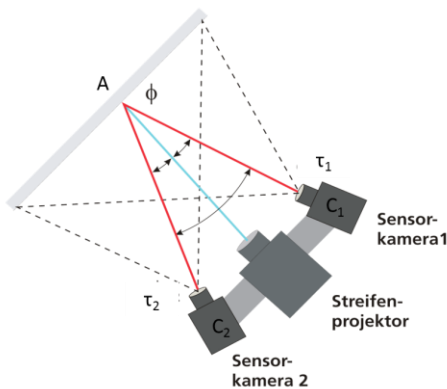


Abbildung 4: Stereo-Triangulation mit aktiver Musterprojektion

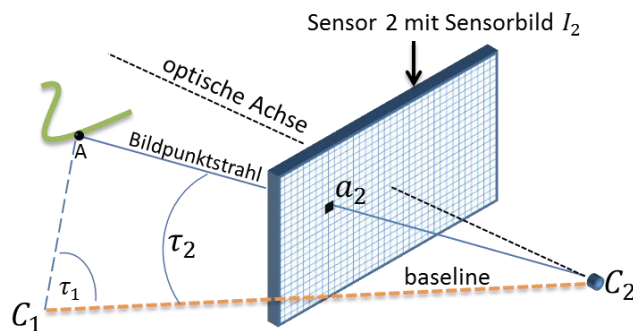


Abbildung 5: Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 5. Bestimmung des Triangulationswinkels τ_2 zwischen der *baseline* und dem Projektionszentrum C_2 von Kamera 2. „a“ ist der Bildpunkt des Objektpunktes „A“ auf dem Kamerasensor.

Aktive Stereophotogrammetrie

Aktive Methoden, wie im Falle dieses Sensors, projizieren ein Muster in das Messfeld und somit auf das Objekt. Über den Vergleich des Musters in den a'_n können die Bildpunkt eines Objektpunktes in allen Sensorbildern gefunden werden. Vom Design dieses Musters hängt ab, wie gut einzelne Objektpunkte kodiert werden können. Deshalb wird i. d. R. die Kodierung erst eindeutig, wenn anstelle eines einzelnen Punktes eine lokal begrenzte oder global erweiterte Umgebung $T \subset I$ eines Objektpunktes einbezogen wird (räumliche Kodierung). Alternativ, kann eine Musterfolge bzw. Bildsequenz I^i mit $i \in \{1 \dots N\}$, die einen Informationsgehalt über die Zeit herstellt, betrachtet werden. Ein Beispiel für ein solches Muster ist in Abbildung 6 gezeigt. Die gezeigten $(1 + \cos)$ -Muster werden mithilfe der Vorschrift $I_{kA}^i = I_0 \cdot (1 + m \cos(\Phi_A + i\Delta_k))$ und $i = 0, \dots, k$ berechnet.

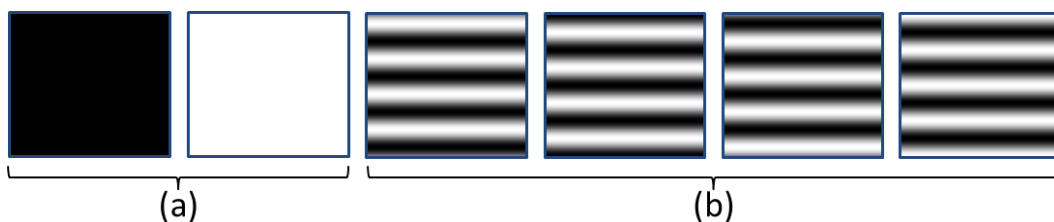


Abbildung 6: Beispiel einer Mustersequenz für Phasenschiebverfahren mit $k = 4$ und $\Delta_M = 90^\circ$. (a) Dunkel- und Hellbild für die Bestimmung der Modulation (b) vier „verschobene“ Sinusoidale-Muster

Anstatt die Intensitätswerte in den Bildpunkten zu vergleichen, wird aus diesen mithilfe der Vorschrift (1) die Phaseninformation Φ'_A gewonnen. Durch die Beschränkungen im Dynamikumumfang der Kameras (8-12bit), würde ein einzelnes Sinusmuster im Kamerabild nicht ausreichen, um genügend Pixel zu kodieren. Daher wird das Muster, wie in Abbildung 6 zu sehen, N -mal wiederholt. Um die ursprüngliche, eindeutige Phase Φ_M nach (2) zu erhalten, muss die Periode N z. B. mittels einer zusätzlichen Gray-Code-Sequenz ermittelt werden:

$$\Phi'_M = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_{43} - I_1}\right) \quad (1)$$

$$\Phi_M = \Phi'_M + N \cdot 2\pi \quad (2)$$

Farbinformationen

Es besteht standardmäßig die Möglichkeit, den Sensor mit einer Spiegelreflexkamera zu erweitern. Diese Kamera erfasst ein zusätzliches Farbbild der Messszene. Da die relative Lage zu den Kameras C_1 und C_2 kalibriert ist, kann das Farbbild auf die gemessene Punktwolke projiziert und als Textur hinzugefügt werden (Farbmapping).

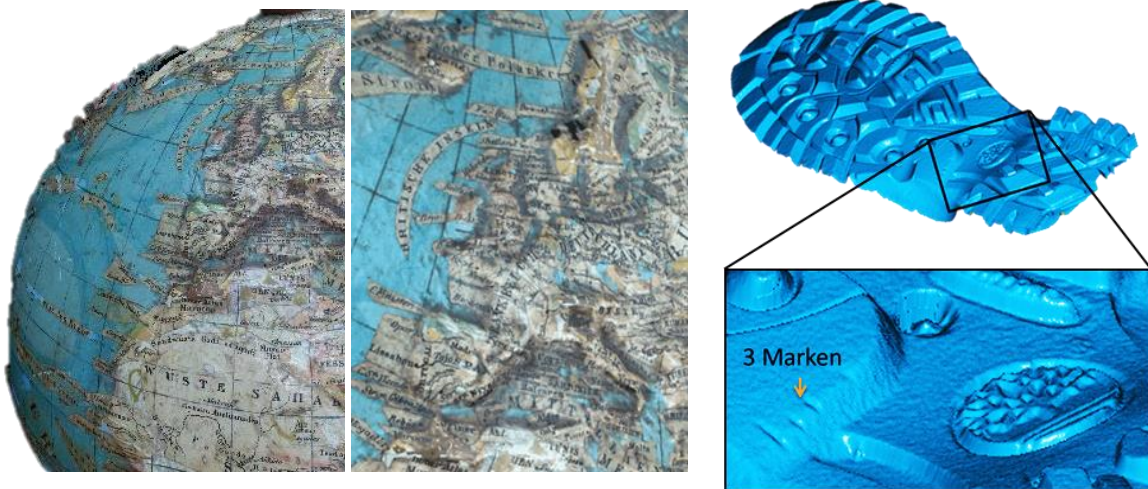


Abbildung 7: Beispiel Messung eines Reliefglobus (links und Mitte), Beispielmessung einer Schuhsohle mit individuellen Identifizierungsmerkmalen (rechts)

Sensor - Aufbau und Eigenschaften

Der vorgestellte Sensor zeichnet sich insbesondere durch ein großes Messfeld, hohe Auflösung und hohe Messgenauigkeit aus. Durch die Integration eines PCs, Touchscreens und Akkus in ein Gehäuse ist ein Betrieb ohne zusätzliches Equipment möglich. Die Bedienung erfolgt über eine Steuersoftware und Bedienknöpfe. Direkt nach dem Scan wird das Ergebnis in einem Vorschaubild angezeigt. Die Messdaten können per USB-Stick heruntergeladen werden. Die optionale Kombination mit einer ansteckbaren Spiegelreflexkamera ermöglicht zusätzlich zur Erfassung hochauflöser Punktwolken das Mapping hochauflöser Farbdaten. In Abbildung 7 ist das Scanergebnis eines texturierten Reliefglobus dargestellt.

Das System ist primär für den schnellen Einsatz am Tatort, beispielsweise zur Sicherung von Schuh- oder Reifenspuren, ausgelegt. Bei der Datenerfassung werden diverse Metadaten (z.B. Bediener, Zeit) erfasst, die die Gerichtsbarkeit der Messdaten sichern. Das System ist auch in anderen Applikationen, die hohe Mobilität erfordern, interessant. Eine weitere Ausführungsvariante ermöglicht beispielsweise den Einsatz unter Wasser.

Referenzen:

[1] Crabbe, S. et. al., "Results from 3D-Forensics – Mobile high-resolution 3D-scanner and 3D data analysis for forensic evidence" 15-17 September 2015, 10th Future Security, Security Research Conference.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	300 x 160 x 230	mm ³	
1.2	Gewicht	3600	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	600 ± 200	nm	
1.4	elektrische Leistung	90	W	
1.5	Versorgung	19 / 4,74 / 0	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom / Akkumulatoren	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP42	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	35000 – 45000	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB 2.0 (auch WLAN-Stick)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	ASC	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	x, y, z, +RGB, +Qualitätswert	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	2-D Matrix (Zeile Spalte)	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3-D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	u.U. Abschattungsbox im Außenbereich	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Handgehaltene Vermessung im Außen und Innenbereich, z. B. Tatortvermessung	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	300 x 185 x 100	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	455	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	1,478 / 0,037	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,083	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,385	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,0281	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,0072	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	2278000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	15	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	140	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	51	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0,17 / 0,17	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	567	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	17400	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	18000	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	126556	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	0,06	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0,06	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	acA2040-180km	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2-D Matrix	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 1280	px	

Nr.	Kenngroße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngroßen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,500 – 15,500	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	60	fps	
7.3	Pixelrate	157 Mpx/s	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	ca. 700	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	-10...+50	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	85	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	nein (messabhängig)	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Farbe, Kompass, Stativ, (wasserdichtes Gehäuse bis 40m Wassertiefe)	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Akkubetrieb, hohe Mobilität, schnelle Inbetriebnahme, mit Abschattungsbox Tageslicht tauglich (vgl. Abb. 3 rechts)	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	Kalibrierung durch den Hersteller aller 2 Jahre empfohlen.	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0,03	h	
Systemkonfiguration der Kenngroßen-Bestimmung				
11.1	Integrierte Rechereinheit: INTEL NUC D54250WYK2 CPU: Intel i5 4250U @ 1.3Ghz / Dual-Core / RAM: 8 GB DDR3L-1600 / OS: Windows 7 SP1			

Sensordatenblatt

1 1

Multiapertur Array Projektor

Firma / Institution	Fraunhofer IOF
Sensorfamilie / Modell	LED-Projektoren / Array Projektor V2
Verfahrens-Einordnung	<i>optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster</i>
Verfahrens-Präzisierung	<i>Aktives, binokulares Triangulationsverfahren mit Lichtprojektion, zeitsequenzielle Korrespondenzsuche über Korrelation von aperiodischen Sinusstreifen</i>




Abbildung 1: Array-Projektor-Modul mit blauen LEDs ($\lambda = 460 \text{ nm}$).



Abbildung 2: Looping-Louie Sensor-Demonstrator.

links: Rotierender Looping-Louie mit fallendem Schokoladenblock
mitte: monochrome 2D-Hochgeschwindigkeitsaufnahme
rechts: Rekonstruierte 3D Punktwolke der linken Szene

Adresse	Fraunhofer IOF Albert-Einstein-Straße 7 07745, Jena	
Telefon	+49 371807206	
E-Mail	Peter.Kuehmstedt@iof.fraunhofer.de	
www	http://s.fhg.de/3DM	

Ausführliche Beschreibung

Allgemeine stereophotogrammetrische Methode

Der vorgestellte Sensor arbeitet zur Bestimmung eines 3D-Messwertes nach dem Triangulationsprinzip, siehe Abbildung 3. Trianguliert wird zwischen den zwei Kamerazentren C_1, C_2 und dem Objektpunkt A , vgl. Abbildung 4. Die C_1, C_2 verbindende Linie wird als *baseline* bezeichnet und ist eine Seite des gesuchten Dreiecks der Triangulation. Ist die relative Lage von C_1, C_2 unveränderlich, kann diese in einem vorgelagerten Prozess, der sogenannten Kalibrierung, einmalig bestimmt werden. Danach wird sie als bekannt vorausgesetzt. Die beiden anderen Schenkel des Dreiecks ergeben sich durch die Fortführung der Verbindungslinie (Bildpunktstrahl) von Kamerazentrum C_1 bzw. C_2 zum Objektpunkt A , vgl. Abbildung 4. Die Abbildung a'_n von A auf den Sensorchip I_n sei der Bildpunkt von A im Kamerasystem von C_1, C_2 . Da die Positionen der a'_n auf den Sensorchips i. d. R. nicht übereinstimmen müssen zugehörige Bildpunkte in den Kamerabildern identifiziert werden. Sind diese gefunden, kann die Triangulation durchgeführt und die Koordinaten von A berechnet werden.

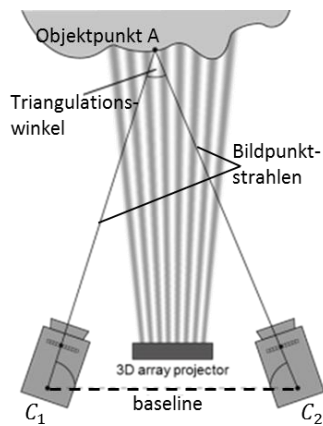


Abbildung 3: Stereo-Triangulation mit aktiver Musterprojektion

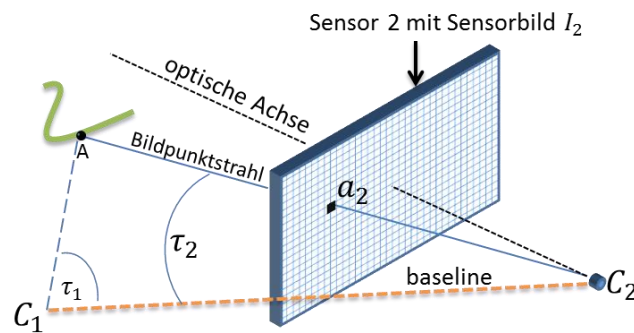


Abbildung 4: Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 5. Bestimmung des Triangulationswinkels τ_2 zwischen der baseline und dem Projektionszentrum C_2 von Kamera 2. „a“ ist der Bildpunkt des Objektpunktes „A“ auf dem Kamerasensor.

Aktive Stereophotogrammetrie

Aktive Verfahren, wie im Falle dieses Sensors, projizieren ein Muster in das Messfeld und somit auf das Objekt. Über den Vergleich des Musters in den a'_n können die Bildpunkte eines Objektpunktes in allen Sensorbildern gefunden gesucht werden. Vom Design dieses Musters hängt ab, wie gut einzelne Objektpunkte kodiert werden können. Deshalb wird i. d. R. die Kodierung erst eindeutig, wenn anstelle eines einzelnen Punktes eine lokal begrenzte oder global erweiterte Umgebung $T \subset I$ eines Objektpunktes einbezogen wird (räumliche Kodierung). Bei diesem Sensor wird eine zeitliche Kodierung durch eine Musterfolge bzw. Bildsequenz I^i mit $i \in \{1 \dots N\}$ vorgenommen, die einen Informationsgehalt über die Zeit herstellt.

Korrelationsverfahren – Aperiodische, sinusförmige Muster

Als Maß für die Ähnlichkeit zweier Bildpunkte $a_1 = (x_1, y_1) \in I_1^i$ und $a_2 = (x_2, y_2) \in I_2^i$ zweier Intensitätsbilder I^i einer Bildsequenz $I^1 \dots I^N$ verwendet der Sensor die normierte Kreuzkorrelation von Intensitäten $I^i(x, y)$, die in einem festen Bildpunkt über die Zeit i gemessen werden:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N [I_1^i(x_1, y_1) - \bar{I}_1(x_1, y_1)] [\bar{I}_2(x_2, y_2) - I_2^i(x_2, y_2)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [I_1^i(x_1, y_1) - \bar{I}_1(x_1, y_1)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [I_2^i(x_2, y_2) - \bar{I}_2(x_2, y_2)]^2}} \quad \text{mit } i \in \{1..N\}, \bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I^i. \quad (1)$$

Im Fall des Hochgeschwindigkeits-Array-Projektors ergibt sich der Kode eines Objektpunktes durch die zeitliche Abfolge von sich ändernden Helligkeits-Intensitäten, die aus aperiodischen sinusförmigen Mustern, vgl. nach der Formel

$$I_{proj}^i(x, y) = a_i(x) + b_i(x) \cdot \sin[c_i(x) \cdot x + d_i(x)] \quad \text{mit } i \in \{1..N\} \quad (2)$$

erzeugt und nach Vorschrift (1) verrechnet werden; siehe dazu auch [2] und **Abbildung 5**.

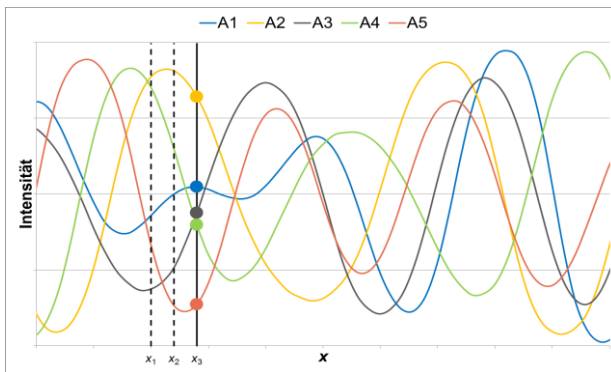


Abbildung 5: Überlagerung aperiodischer *sin*-Muster
Die Schnittpunkte an den Stellen x_1, x_2, x_3 mit den *sin*-Kurven haben in lokaler Nachbarschaft maximale Varianz

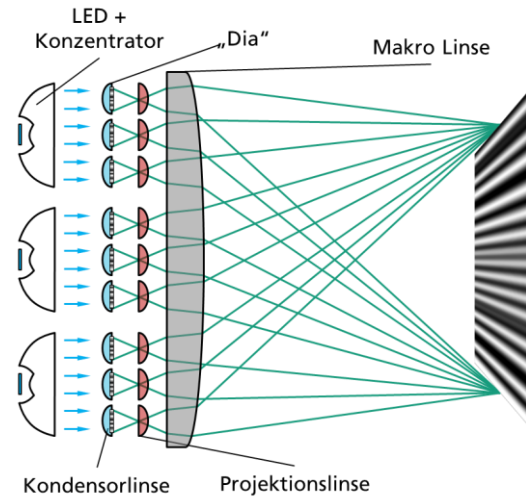


Abbildung 6: Funktionsprinzip des Muster-Projektors des Sensors

Sensor - Aufbau und Eigenschaften

Der nach dem vorgestellten Verfahren arbeitende Sensor zeichnet sich insbesondere durch seine extrem hohe Projektionsfrequenz von bis zu 80 kHz aus. Um dies bei akzeptablen Lichtverhältnissen realisieren zu können, kommen Hochleistungs-LEDs zum Einsatz, welche ein Cluster aus miniaturisierten Diaprojektoren beleuchten, siehe **Abbildung 6**. Die Überlagerung der Projektionen eines Clusters ergibt dann das gewünschte Muster, innerhalb eines vorgegebenen Schärfentiefe-Bereichs [1]. Die Geschwindigkeitsbegrenzung ist demgegenüber wesentlich durch die Wahl des zugehörigen Kamerapaars bestimmt. In der vorliegenden Variante können zwischen ca. 3000 3D Frames pro Sekunde bei einem Megapixel Auflösung erreicht werden. Die Beispielrekonstruktion für einen dynamischen Prozess kann **Abbildung 7** entnommen werden.

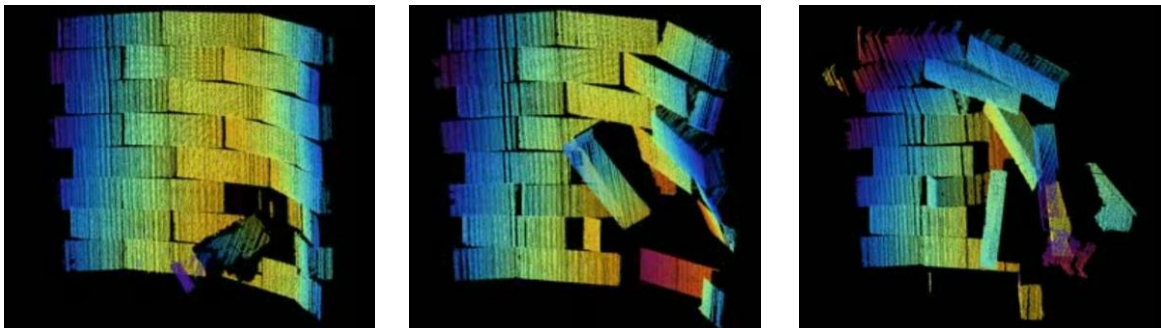


Abbildung 7: Rekonstruktion der dynamische 3D-Messung einer einstürzenden Bausteinwand

Referenzen:

- [1] Bräuer-Burchardt, C., Heist, S., Kühmstedt, P., Notni, G., "High-speed 3D surface measurement with a fringe projection based optical sensor," 28 May 2014, 91100E.
- [2] Heist, S., Mann, A., Kühmstedt, P., Schreiber, P., Notni, G. "Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement". 2014, Optical Engineering 53 (11): 112208–112208.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	350x290x170	mm ³	
1.2	Gewicht	3500	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	460 ± 20	nm	
1.4	elektrische Leistung	450	W	
1.5	Versorgung	230V (AC)	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP30	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine (inkohärentes Licht)	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	a. A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	2x GigE (RJ-45)	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	C-API, Datei (ASC etc.)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	x, y, z(, Intensität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	2-D Matrix (Zeile Spalte)	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D-Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	-	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Bewegungsanalyse, high-speed Prozesse	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	300x300x200	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	850	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	4,48 / 0,5	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	1,24	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	3,73	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,24	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,033	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	925410	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	-/-/13	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-/-/216	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	50,25	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0,29/0,29	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	1,8	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	133	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	135	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	3000 · 10 ⁶	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	3000	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	9	fps	
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	IDT Vision NX-3	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2-D Matrix	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1024x1024	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,333	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	3000	fps	
7.3	Pixelrate	$3000 \cdot 10^6$	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	-	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	10 - 40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	NIR Variante	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Max. Projektionsrate ca. 80 kHz	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	-	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	1	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i7 @ 3.4Ghz / RAM: 16GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 SP1 / NET: 2x ASUS onboard Gigabit Ethernet mit Cat 5e Kabel / HDD: 256GB Samsung EVO 820			


Sensordatenblatt

#12

reflectCONTROL COMPACT	
Firma / Institution	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG
Sensorfamilie / Modell	reflectCONTROL COMPACT / Modell RCC130-105
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Reflexion → Deflektometrie
Verfahrens-Präzisierung	Deflektometrischer Stereo-Sensor zur Vermessung spiegelnder Oberflächen



Abbildung 1: reflectCONTROL COMPACT

Adresse	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG Königbacher Str. 15 94496 Ortenburg	
Telefon	0049 8542 168 – 150	
Email	info@micro-epsilon.de	
www	www.micro-epsilon.de	

Ausführliche Beschreibung**Messprinzip der phasenmessenden Deflektometrie**

Der vorgestellte Sensor arbeitet nach dem Messprinzip der phasenmessenden Deflektometrie. Das Messverfahren eignet sich insbesondere für die Defekterkennung und Vermessung ebener spiegelnder Flächen. Bei der Deflektometrie wird nicht die Oberfläche selbst untersucht, sondern deren optisch verzerrende bzw. intensitätsschwächende Wirkung, die sich im Spiegelbild eines Musters zeigt. Dabei wird ein Sinusmuster auf einem Display dargestellt und anschließend das Spiegelbild dieses Musters mit einer Kamera aufgenommen. Unter Phasenverschiebung des dargestellten Musters werden einige wenige Bilder mit einer CCD-Kamera aufgenommen und an Hand der gewonnenen Daten algorithmisch Krümmungen und Intensitätsamplituden vollflächig ermittelt. Diese Technik ist den scannenden Verfahren dahingehend überlegen, dass über die gesamte von der Kamera erfasste Fläche die gesuchten lokalen Krümmungs-, Intensitäts- und Amplitudendaten zur Verfügung stehen. Der Vorteil des Stereo-Messsystems liegt in der simultanen Bildaufnahme zweier Kameras aus verschiedenen Richtungen. Die kombinierte Auswertung der Daten beider Kameras erlaubt eine stabile 3D-Rekonstruktion des Messobjekts.

Vorraussetzung für die 3D-Rekonstruktion ist eine Kalibrierung. Hierbei werden mit Hilfe eines speziellen Kalibrierspiegels die Positionen der Kameras, des Bildschirms sowie die Abbildungseigenschaften der Kameras ermittelt. Die 3D-Rekonstruktion liefert eine Punktwolke mit XYZ-Koordinaten

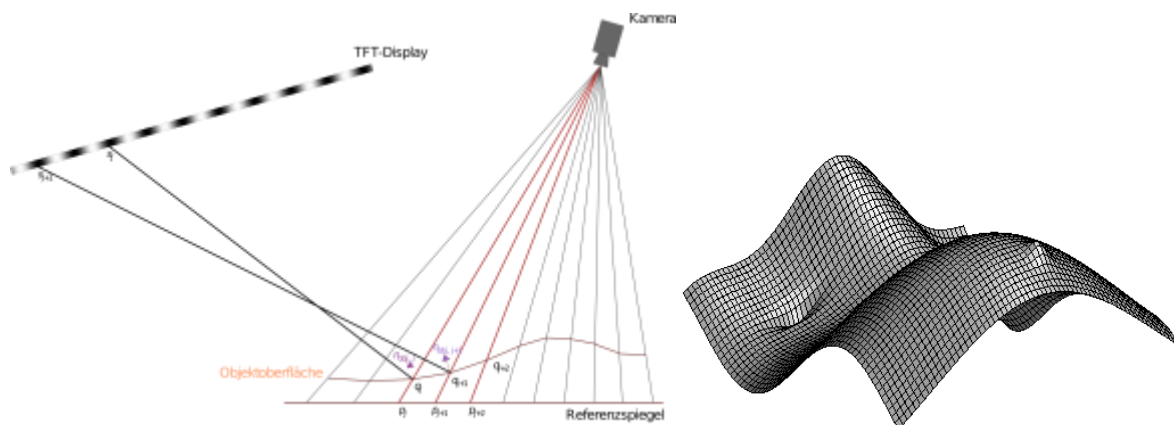


Abbildung 2: Messprinzip (links) und Messergebnis 3D-Rekonstruktion (rechts)

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	452 x 452 x ca. 382	mm ³	
1.2	Gewicht	Ca. 17	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	400 - 700	nm	
1.4	elektrische Leistung	200	W	
1.5	Versorgung	100-240V, <2A, 50-60Hz	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	n. a.	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	55.000,- ... 95.000,-	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Ethernet (UDP), Digital I/O, VGA, USB	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {TIFF, BMP}, Sockets	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z, lokale Krümmung, Amplitude, Basisintensität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	Kalibrierspiegel	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Vermessung spiegelnder Oberflächen, wie Teleskopspiegel, Displays,...	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	105 x 87 x 40	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	30	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,028 / 0,095	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,100	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,005	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	$5 \cdot 10^{-6}$	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	$4 \cdot 10^{-6}$	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	4008032	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 38	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 168	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	19	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	0,070 / 0,070	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	2200	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	18600	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	20800	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	192693	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	0,455	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0,048	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	SONY ICX 274	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix (x,y)	(text)	

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1624 x 1234	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	4	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	14	fps	
7.3	Pixelrate	28 Mio	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	-	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	+15 ... +35	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	75%, keine Kondensation	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	-	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Software Pakete für 2D-Auswertung und Defekterkennung verfügbar	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Integrierte Höhenverstellung Integrierte Fremdlichtabschattung	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	-	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	<15min	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1				

Sensordatenblatt

#13

scanCONTROL 29x0-100	
Firma / Institution	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG
Sensorfamilie / Modell	scanCONTROL 29x0-100
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Laserprojektion
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Triangulationsverfahren mit aufgefächertem Laserstrahl
	
<p>Abbildung 1: Messsystem scanCONTROL 29x0-100.</p>	
Adresse	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG Königbacher Str. 15 94496 Ortenburg
	
Telefon	0049 8542 168 – 0
Email	info@micro-epsilon.de
Homepage	www.micro-epsilon.de

Ausführliche Beschreibung

Messprinzip Laserlinientriangulation

Die scanCONTROL-Sensoren von Micro-Epsilon arbeiten, ähnlich den herkömmlichen Laserpunktsensoren, nach dem Prinzip der optischen Triangulation. Der Laserstrahl einer Laserdiode wird dabei mittels einer Spezialoptik aufgefächert und auf ein Messobjekt projiziert. Die Empfangsoptik fokussiert das diffus reflektierte Licht, welches schließlich von einem CMOS-Sensor detektiert wird. Um sicherzustellen, dass nur die Reflexion der projizierten Laserlinie ausgewertet wird, befindet sich vor dem Sensor ein Filter, der dafür sorgt, dass nur Licht im Wellenlängenbereich des Lasers passieren kann.

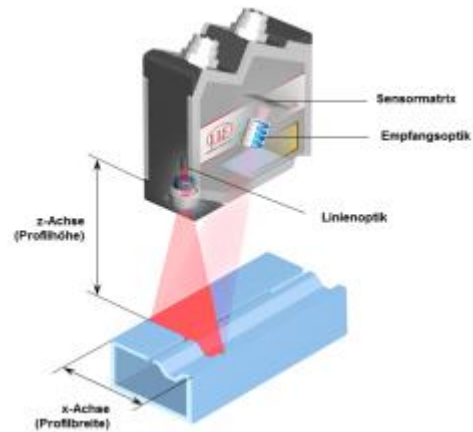


Abbildung 2: Komponenten scanCONTROL

Anhand der Position des detektierten Laserstrahls innerhalb einer Sensormatrixspalte kann nun mittels Triangulation der Abstand der Einzelmesspunkte von einer definierten Referenz im Sensor (z-Achse) bestimmt werden. In der Regel wird diese Referenz so gewählt, dass sich die Abstandswerte auf die Unterkante des Sensors beziehen. Die allgemeine Abstandsberechnung erfolgt über folgende Formel:

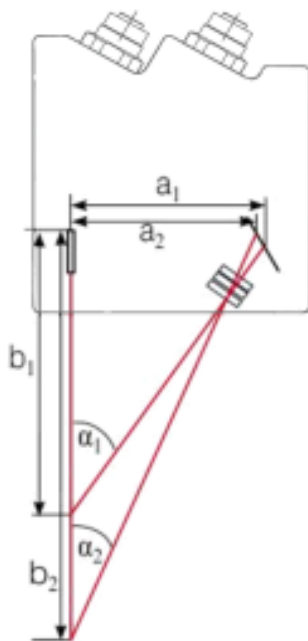


Abbildung 3: Triangulation

$$b_1 = \frac{a_1}{\tan \alpha_1}$$

Die Messauflösung in z-Richtung ist durch die Pixelanzahl der Sensormatrix in der z-Achse festgelegt. Entsprechend der Position der Messpunkte innerhalb einer Reihe der Matrix wird ein Abstandswert einem korrespondierenden Punkt auf der x-Achse zugeordnet. Die Anzahl der Pixel der Sensormatrix in x-Richtung entscheidet dann darüber, wie viele Einzelmesspunkte es gibt.

scanCONTROL 29x0-100

Der 29xx-Sensor mit einem Messbereich von 100 mm erreicht eine Referenzauflösung von 12 µm bzw. eine Linearität von 0,16 % des Messbereiches und ist damit geeignet für Anwendungen in der Qualitätskontrolle, in Fertigungsprozessen und in der Automation.

Das direkte Messergebnis ist ein zweidimensionaler Profilverlauf, welcher auf eine Maßeinheit [mm] kalibriert ist. Dadurch ist sowohl eine referenzielle, als auch eine absolute Messung mög-

lich. Eine 3D-Messung erfolgt über eine gleichförmige Bewegung in y-Richtung bei definierter Profilfrequenz, wodurch ein Gitternetz mit äquidistant verteilten Punkten generiert werden kann.



Abbildung 4: Messung an realem Target (Spalt)

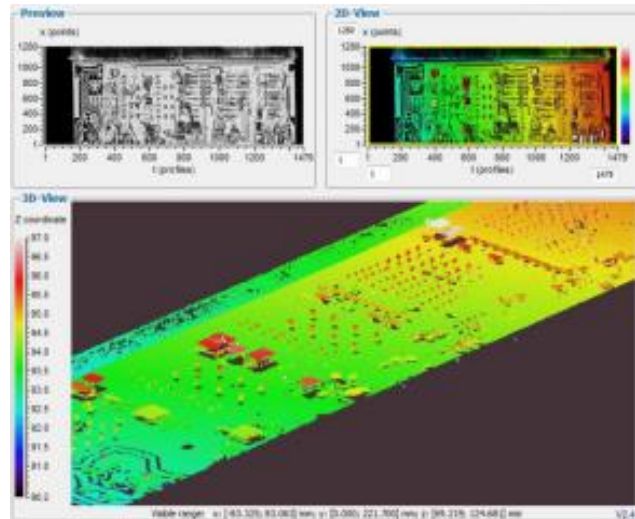


Abbildung 5: 3D-Ansicht einer Leiterplatte

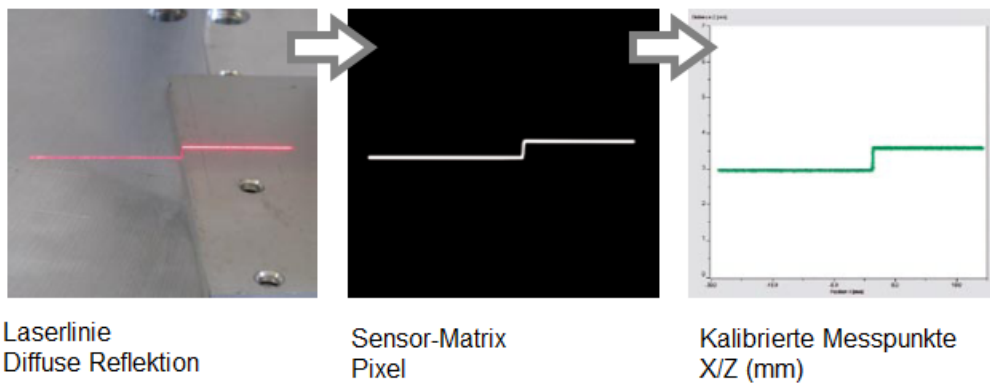


Abbildung 6: Rohdatenaufnahme aus Laserlinie

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	96x85x33	mm ³	
1.2	Gewicht	380 (ohne Kabel)	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	658	nm	
1.4	elektrische Leistung	max. 12	W	
1.5	Versorgung	24V 230V über externes Netzteil	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP65	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	8 mW Laser (Laserklasse 2M)	(text)	
1.9	Sensormpreis (Preisspanne)	6.000 – 10.000	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Ethernet (RJ45), RS422 / Modbus, TCP/IP, UDP, GVCP, GVSP, GeniCam	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei{STL, AVI, TXT, CSV, 16-bit PNG, ASC, SLK}, API/SDK (Win, Linux)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	X, Z, Intensität, Reflexionsweite, Moment 0, Moment 1, Y-Werte über Encoder/Verfahrgeschwindigkeit im Verhältnis zu Messfrequenz	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter falls 3D (Abstände ~ Verfahrgeschwindigkeit / Messfrequenz), 2D-Punktachse	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht aus 2D-Profilen	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	Verfahreinheit / Roboter / bewegliches Messobjekt	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Kleberauben, Schweißnähte, Spaltmaße, etc.	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	max. (~300)x146x265 L hängt von Messdauer ab	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	125-390	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,11202 / 0,10914	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,10425	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	max: 0,080	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,017 ¹	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,017 ¹	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	Abhängig von der Länge des Messtargets und von der eingesetzten Software (max. Wert ME 3D-View Software: 2944000 px)	pt	

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	9,5, 27,65, 15,26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	65,5	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	~30	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	(0,045 – 0,094 -)	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm^{-1}	
4.2	Grenzradius (x y)	x: 0,130 y: abh. Verfahrensgeschwindigkeit	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	Abhängig von der Länge des Messtargets (für 1280x1280px min. 640 ms)	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	Abhängig von Messung / Messumgebung	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	Abhängig von der Länge des Messtargets	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	2.560.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	Abhängig von der Länge des Messtargets (für 1280x1280px max. 1,56 fps)	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	Kontinuierlich	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	-	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	-	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1280x1024	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,010-40 (Belichtungsabh.)	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	2000	fps	
7.3	Pixelrate	188.743.680	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	10000	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0-45	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	Nicht beschlagend	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	Max. delta 0,052 (rot -> schwarz)	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	-0,021	mm	
9.3	Transluzenz		(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Analog, Digital Out	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	blauer u. roter Laser verfügbar	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF		(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme		h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1				

Anhang A

¹Kombination von räumlich und zeitlich, aufgrund des Messprinzips.

² x-Datenpunktabstand: 45-94µm (je nach z-Abstand), y-Datenpunktabstand abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit im Verhältnis zur Profillfrequenz (meist gleich dem Datenpunktabstand in x gewählt)

Nr.	Kenngroße	Werte	Einheit	Prüfkörper
-	Öffnungswinkel der Laserlinie	25	°	
-	Max. Messbreite in x-Richtung	83,1 – 120,8	mm	
-	Max. Messbreite in x-Richtung (erweiterter MB)	58,5 - 143,5	mm	

Anmerkung: Alle von der y-Achse abhängigen Messgrößen sind nicht voll aussagekräftig, da die Qualität der Verfahreinheit voll in die Ergebnisse eingeht. Dies wurde versucht durch Optimierung der Bewertung auszugleichen, kann aber nicht vernachlässigt werden.

Sensordatenblatt

#14

<h2>Array</h2>	
Firma / Institution	INB Vision AG
Sensorfamilie / Modell	surfaceCONTROL1400-500
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Triangulationsverfahren mit Lichtprojektion
	
Adresse	INB Vision AG Leipziger Straße 44, ZENIT II 39112 Magdeburg
Telefon	+49(0)391/6117-300
Email	info@inb-vision.com
www	www.inb-vision.com



Ausführliche Beschreibung

Streifenprojektion

Der Sensor berechnet nach dem Triangulationsprinzip 3D-Messwerte mit Hilfe von zwei Kameras und einer aktiven Beleuchtung mit einer Sequenz von Streifenmustern (siehe **Abbildung 1**). Für jeden Messwert wird eine x- und y-Koordinate im Sensorkoordinaten-system vorgegeben. Die Position und Orientierung der Kamera ist bekannt. Für die Berechnung der z-Koordinate muss der Messpunkt in beiden Kameras einer Pixelkoordinate zugeordnet werden. Hierzu wird die Sequenz der Streifenmuster genutzt. Der Messpunkt zeichnet sich in beiden Kameras durch eine identische Grauwertfolge in der Bildsequenz aus (**Abbildung 2**). Für weitergehende Informationen sei auf [1] verwiesen.

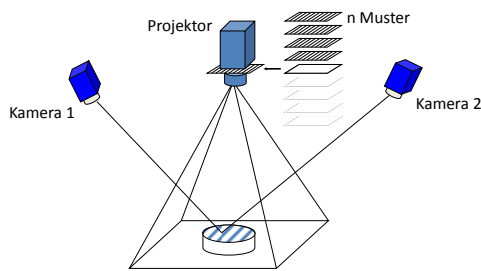


Abbildung 1: Stereo-Triangulation mit aktiver Musterprojektion

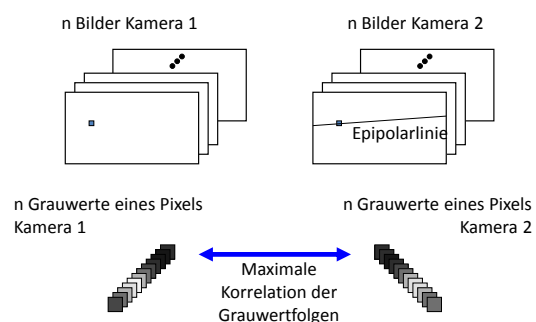


Abbildung 2: Korrelation über die Phasen der Mustersequenz

Graycode Verfahren

Da die Streifen mehrdeutig sind, werden für die Berechnung mit dem Streifenprojektionsverfahren Näherungswerte benötigt. Der Sensor kann mit externen Näherungswerten arbeiten, diese aber mit Hilfe des Graycode-Verfahrens auch selbst ermitteln. Hierzu wird eine Sequenz von Streifenmustern projiziert, bei der jeder Pixel eindeutig einem korrespondierenden Pixel im anderen Kamerabild zugeordnet werden kann (**Abbildung 3**).

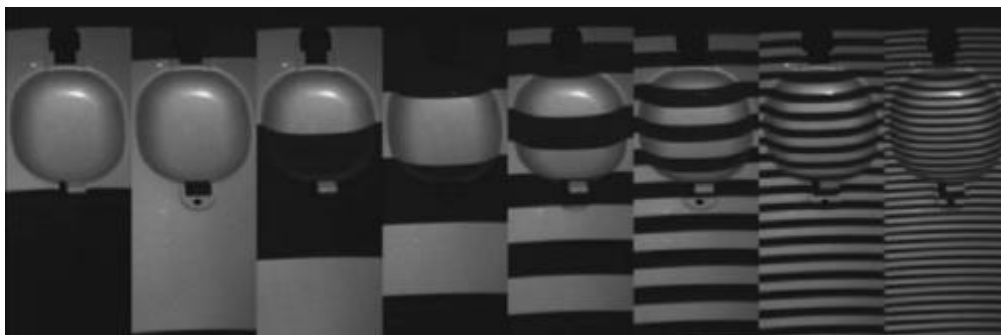


Abbildung 3: Graycode-Sequenz

Sensor – Aufbau und Eigenschaften

Der Sensor wird durch einen externen PC angesteuert. Die Ansteuerung der Kameras erfolgt über FireWire. Die Projektionseinheit des Sensors wird über ein VGA-Kabel angesteuert.

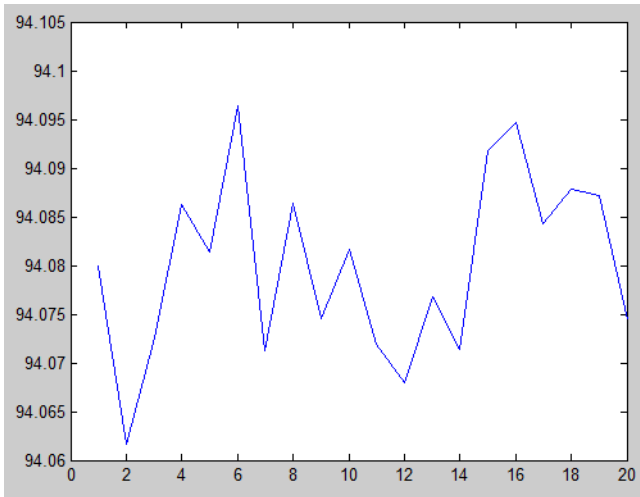
Referenzen:

[1] Lilienblum, E.; Michaelis, B.: Optical 3D Surface Reconstruction by a Multi-Period Phase Shift Method. 2007 ACADEMY PUBLISHER

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	626x311x154	mm ³	
1.2	Gewicht	9.200	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	Sichtbares Licht	nm	
1.4	elektrische Leistung	max. 350	W	
1.5	Versorgung	~230V, 1,4 A	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko) und PoE oder Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP20	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensormpreis (Preisspanne)	k.A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	1394b, VGA	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei (ASCII, Matlab)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	nein	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D Oberflächeninspektion diffus streuender Oberflächen	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	370x290x200 - untere Ebene: 420x310 - obere Ebene: 370x290	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	750	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,058 / +0,118	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,094	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	Nicht zutreffend	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,061	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,0032	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,0094	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	9 Mio (0,1mm Abstand)	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	28,4 (mean)	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	444 (nur ein Kamerapaar)	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	51	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	1	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	1,2	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	6.700	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	4.200 (1mm Punktabstand)	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	10.900	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	11.600	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	0,1	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0,1	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	AVT Stingray F145B	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / (x,y)	ms	

Nr.	Kenngroße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1388x1038	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	px/s	
Zeitbezogene Kenngroßen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,290	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	3,5	fps	
7.3	Pixelrate	4,9 M	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	-	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	5..40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	20..80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	siehe Anhang	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	0,0374	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Werkzeuge zum Messen von Oberflächenformehlern: - Digitaler Master - Digitale Hülle - Digitaler Abziehstein Montage auf Roboter, Integration in Anlage	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Keine Angaben	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	Keine Angaben	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	15 Minuten	h	
Systemkonfiguration der Kenngroßen-Bestimmung				
11.1	Intel Core i7 CPU 960 @3,2 GHz, 4 GB RAM, Win7 64 Bit			

z-Koordinate

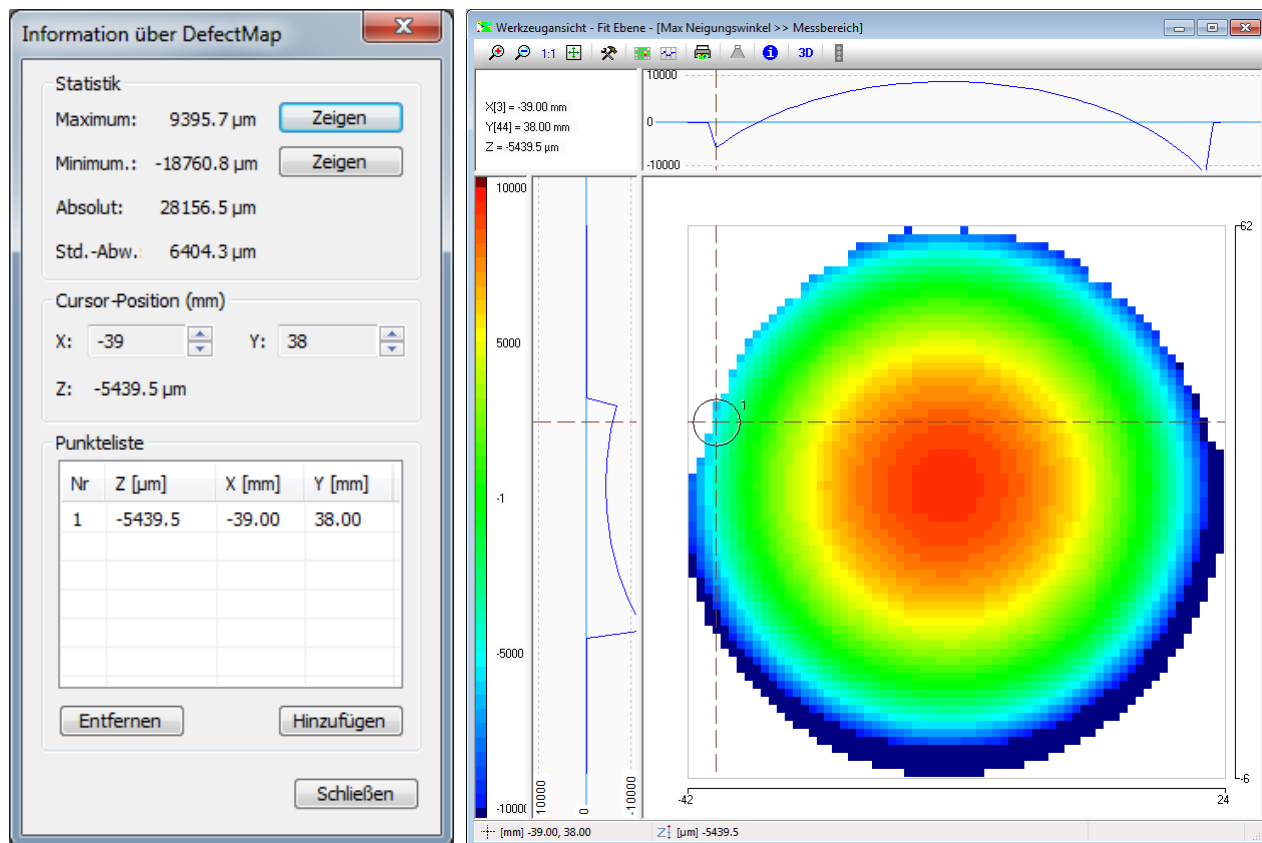


Messung Nr.

Verlauf der Messwerte über die 20 Messungen

3.9: Begrenzung durch Software auf 3000x3000 Punkte. Test durchgeführt mit Punkteabstand von 0.1 mm

3.12: Aufnahme einer Kugel mit 75 mm Durchmesser

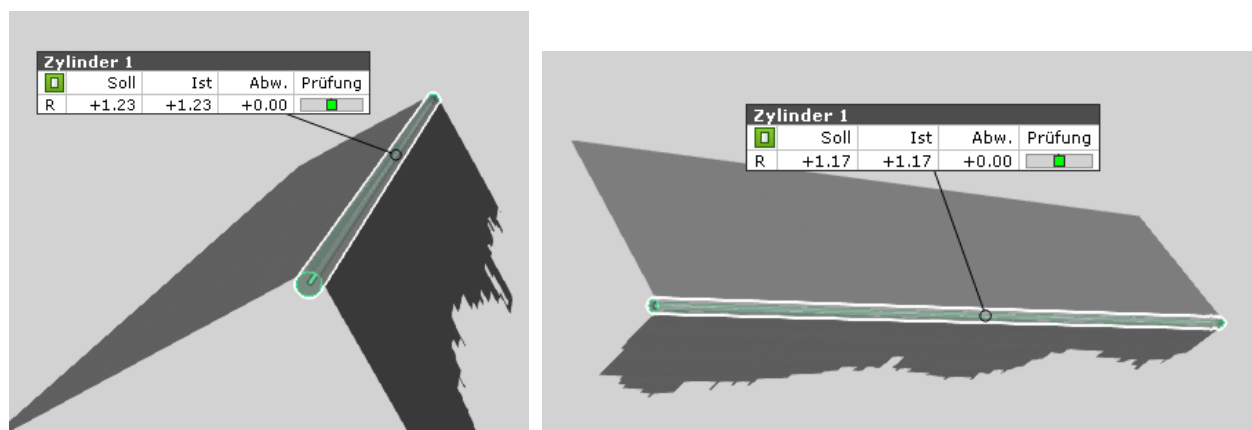


Ausgabe des Punktes 2 mit Normalenvektor:

X	y	z	dx	dy	dz
-39.000000	38.000000	-6.382596	-0.751544	0.221275	0.621466

Berechnung des Winkels: $dxy = 0.78$ $\varphi_N = \tan(dxy / dz) = 51^\circ$

4.1 Best Fit eines Zylinders in die vermessene Kante in x und y-Richtung

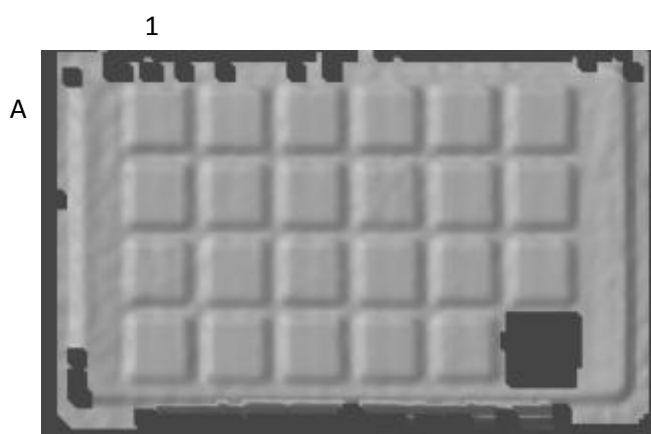


5.x: Test mit Messung 3.1 unten, 421 x 301 Messpunkte (A3 Messfeld) – Einstellungen von sC2310 übernommen, Wartezeit der Kameras: 200 ms, Punkteabstand 1mm

9.1: Bestimmung Parameter „Textur Farbe/Grauwert“

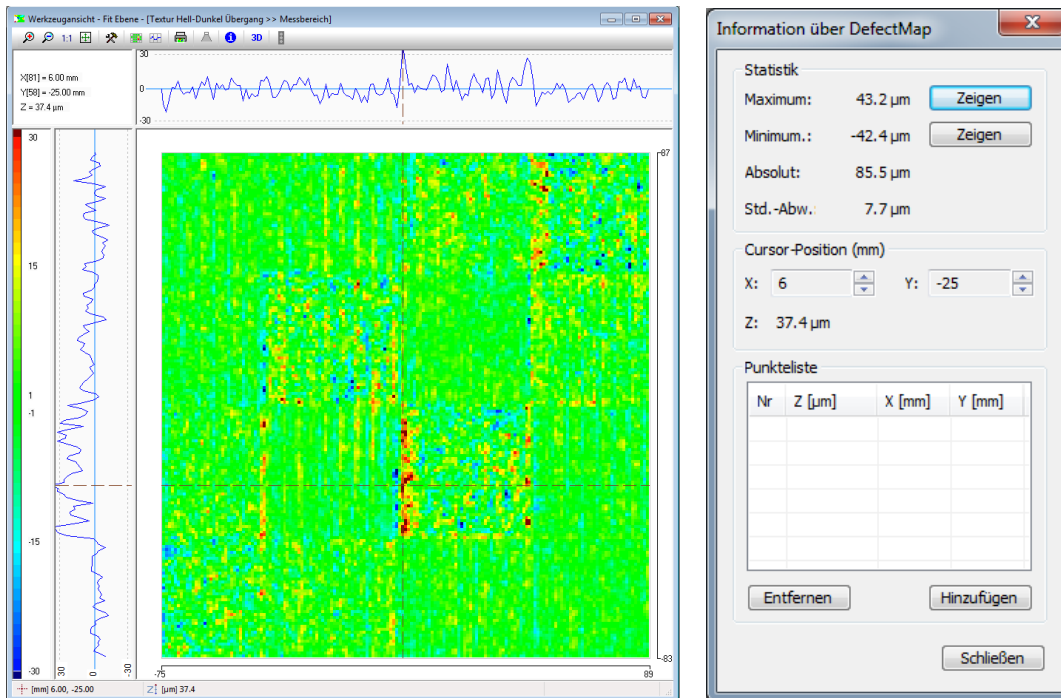
Rauschwerte werden entsprechend Methode „lokales Rauschen in z-Richtung räumlich“ für jedes Farbfeld der Farbtafel bestimmen und als Matrix eintragen.

Verwendetes Test Chart für die Bestimmung des Wertes „Textur Farbe/Grauwerte“: x-rite Passport. Bezeichnung der Felder siehe Bild. Das rechte Bild stellt die Colormap dar. Die Werte werden durch eine AOI aus der Colormap ermittelt.



9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	14,2 6,3 18,6 6,3 11,9 15,0 7,0 5,0 7,1 9,8 13,9 7,3 11,0 15,8 7,7 12,2 8,0 8,4 9,7 16,1 10,5 11,0 8,1 -	μm	
-----	--	---	---------	--

9.2: Es werden Farbübergänge erzeugt, die bestimmten x-rite Passport-Farben entsprechen. Als Parameter wird der Wert für den Übergang D2 -> D5 in waagerechter Richtung eingetragen. Da die Erhöhung der Kante ortsabhängig ist, wird der Wert im mittleren Bereich ausgewertet.



Sensordatenblatt

#15

LINE	
Firma / Institution	INB Vision AG
Sensorfamilie / Modell	surfaceCONTROL2000-400Z (Diffraktiv)
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Triangulationsverfahren mit Lichtprojektion (Multiphasen-Sinustmuster), 3D-Berechnung mit Zeitkorrelationsverfahren
	
Adresse	INB Vision AG Leipziger Straße 44, ZENIT II 39120 Magdeburg
Telefon	+49(0)391/6117-300
Email	info@inb-vision.com
www	www.inb-vision.com



Ausführliche Beschreibung

Zeilenkameramesskopf

Bei diesem Sensor handelt es sich um ein aktives Stereo-Vision-System mit Zeilenkameras unter Verwendung von strukturiertem Licht. Die Zeilenkameras sind koplanar ausgerichtet, d.h. Objektpunkte im Messvolumen des Sensors werden unabhängig von ihren Koordinaten immer von beiden Zeilenkameras gesehen (Abbildung 1).

Um wie beim Streifenprojektionsverfahren Messpunkte im Kamerabild zu korrelieren, wird eine Mustersequenz projiziert und die Grauwertfolge einzelner Pixel miteinander verglichen.

Für die Berechnung der z-Koordinate muss der Messpunkt in beiden Kameras einer Pixelkoordinate zugeordnet werden. Hierzu wird die Sequenz der projizierten Muster genutzt. Der Messpunkt zeichnet sich in beiden Kameras durch eine identische Grauwertfolge in der Bildsequenz aus.

Für die 3D-Messung ist eine Relativbewegung zwischen Sensor und Messobjekt erforderlich.

Die Relativbewegung muss auf die Musterfrequenz abgestimmt sein, da sonst während der aufgenommenen Sequenz die Änderung am Messobjekt zu groß wird und in diesem Fall keine 3D-Punkte aufgenommen werden können.

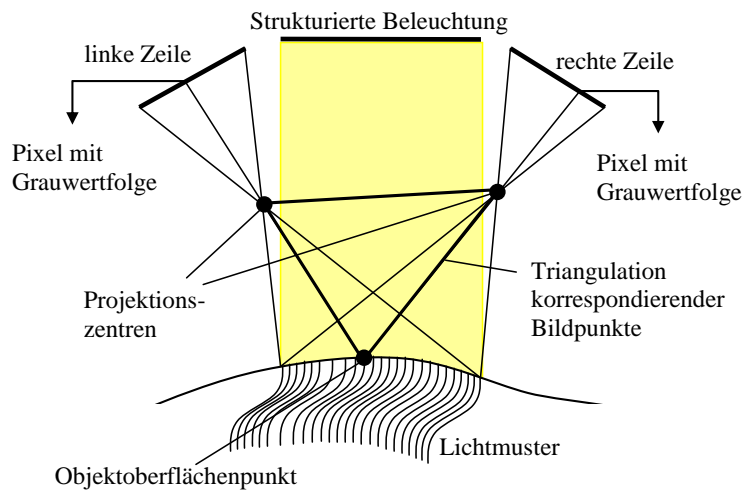


Abbildung 1: Beispiel für ein Zeilenkamerasensor in der Frontansicht

Strukturierte Zeilenbeleuchtung

Die strukturierte Beleuchtung muss sich durch eine hohe Intensität im Bereich der betrachteten Zeile sowie eine hohe Musterfrequenz auszeichnen. Aus diesem Grund wird eine strukturierte Linienbeleuchtung genutzt. Die Linienbeleuchtung wird gemeinsam mit den Zeilenkameras koplanar ausgerichtet.

Die Wechselfrequenz der Muster der strukturierten Beleuchtung muss mindestens so groß wie die Frequenz der Zeilenkamera sein.

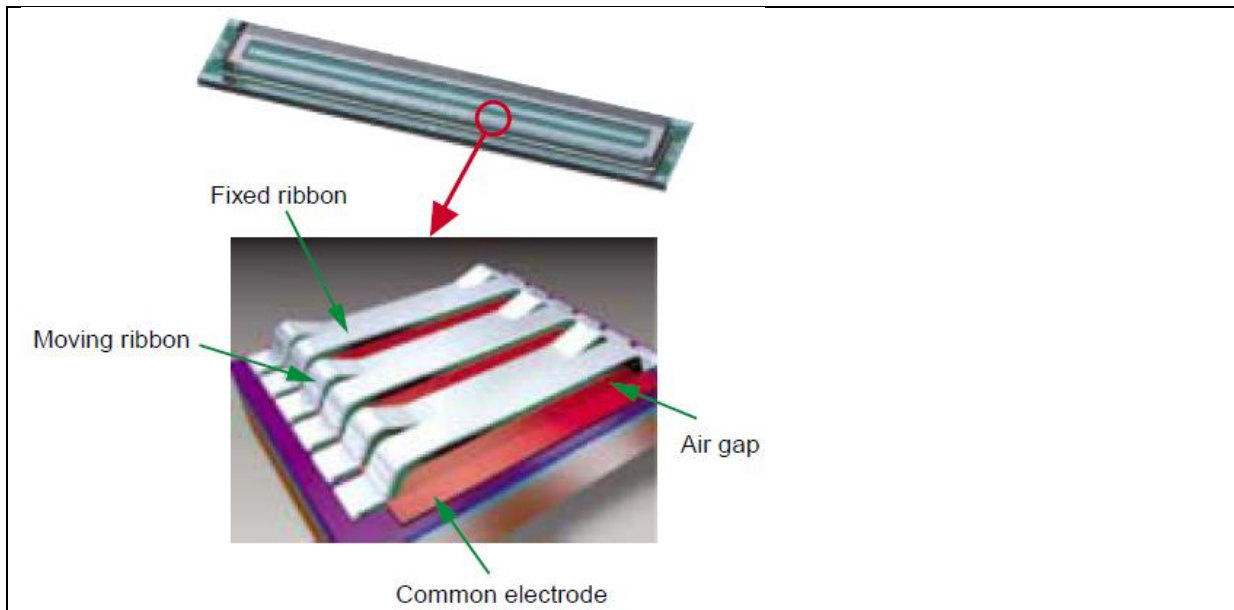


Abbildung 2: Aktives Zeilendisplay

Bei der hier verwendeten Beleuchtung wird ein aktives Zeilendisplay mit 1088 Pixeln genutzt (Abbildung 2), mit welchem beliebige Muster und Musterfolgen projiziert werden können. Dabei wird eine Laserzeile pixelweise über Beugung an einem Gitter moduliert. Jedes Pixel besteht aus einer geraden Anzahl von Metallbändern, von denen die eine Hälfte starr ist und die andere Hälfte je nach angelegter Spannung den Abstand zur darunter liegenden Elektrode verändern und somit die Beugung des Lichtes beeinflussen kann (Abbildung 3).

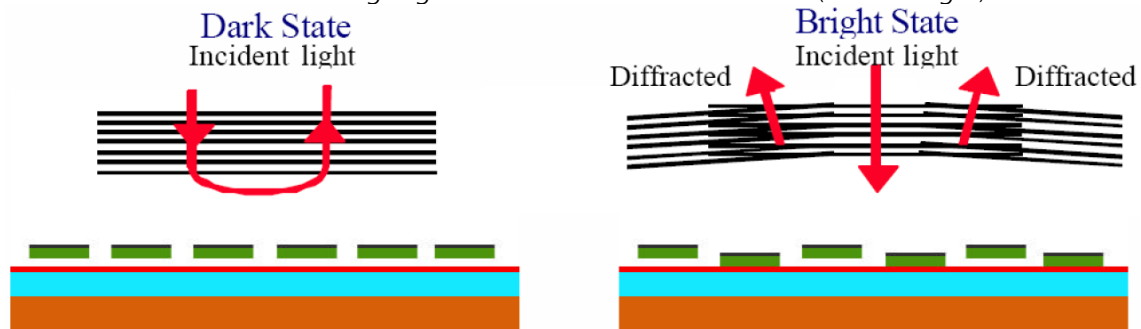


Abbildung 3: Funktionsprinzip des aktiven Zeilendisplays

Damit ist für jedes Pixel eine sehr schnelle analoge Grauwertdarstellung möglich.

Entwicklungsstand des Verfahrens

Das Verfahren befindet sich derzeit in der Entwicklung. Die Untersuchungen erfolgten deshalb an einem Labordemonstrator. Es ist davon auszugehen, dass sich messtechnische und sonstige Parameter noch verbessern lassen.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	750x600x300	mm ³	
1.2	Gewicht	20	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	532	nm	
1.4	elektrische Leistung	k.A.	W	
1.5	Versorgung	~230V,	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	k.A.	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Laserklasse 3B	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	k.A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	<i>Gigabit Ethernet, RS232</i>	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	<i>Datei (ASCII)</i>	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Z)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Linie: gleichabständig in x	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	2D Linienschnitt	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	nein	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D Oberflächenprüfung von diffus streuenden Oberflächen	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	367x[Vorschub]x100	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	450	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,599 / 2,407	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,458	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	k.A.	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,282	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,0034	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,087 ¹	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	1835	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- / - / 33,4	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- / - / 454,6	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	57,4	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	1	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	1,29 / 1,38	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	10	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	26	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	36	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	50972	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	100	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	38,5	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	Teledyne Dalsa SG-11-02K80	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	1D Zeile / (x)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1x2048	px	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,100	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	10.000	fps	
7.3	Pixelrate	20.480.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	k.A.	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	5..50	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	20..80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	0,0106 0,0068 0,0147 0,0082 0,0112 0,0087 0,0055 0,0053 0,0063 0,0065 0,0070 0,0069 0,0063 0,0069 0,0050 0,0075 0,0060 0,0065 0,0075 0,0160 0,0084 0,0077 0,0053 0,0243	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	0,024	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Lineartisch	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Labordemonstrator	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	k.A.	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	k.A.	h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	Intel Core i7 (1. Generation) Q720 @1,6 GHz 4 GB RAM Windows 7, 64 Bit			

Anhang A

¹Fehler der Lineareinheit und Einspannung mit enthalten.

Für die Auswertung der Messungen wurden einheitlich folgende Parameter gewählt:

V_{Linear} (Vortrieb der Lineareinheit)	20 mm/s
f_{Zeile} (Zeilenfrequenz)	10 kHz
Zeilenabstand	1 mm (0.2 mm für Kenngrößen 3.9 und 5.x)

Zu 3.6: Ebenheitsmessabweichung nur für 5 Positionen (statt 6) bestimmt.

Position 1: Messebene

Position 2: Messebene -50mm

Position 3: Messebene -100mm

Position 4: Messebene +50mm

Position 5: Messebene +100mm

Zu 3.7:

Rauschen für Messebene -50mm (hier vermutlich beste Abbildungseigenschaften)

50x50mm aus der Mitte der Ebene herausgeschnitten und mit Spline-Tool das Rauschen bestimmt (Unterabtastung: 10)

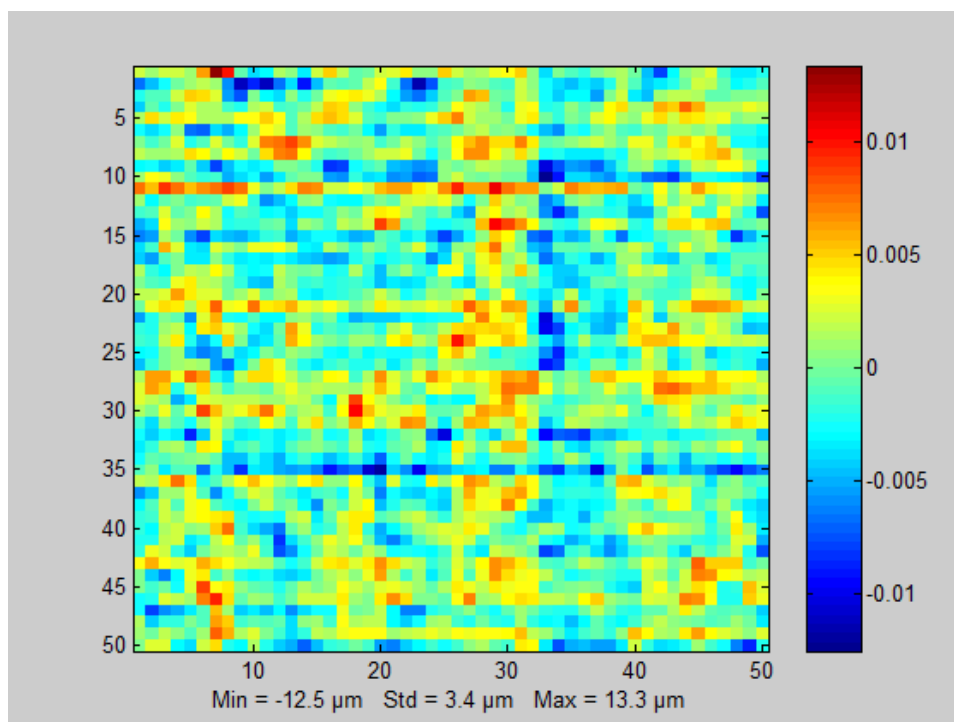


Abbildung 4: Kenngröße 3.7 - Rauschen räumlich

Zu 3.9: bei Punktabstand 0,2mm

Zu 3.12: Aufnahme einer Kugel mit 75 mm Durchmesser (Maximaler Neigungswinkel)

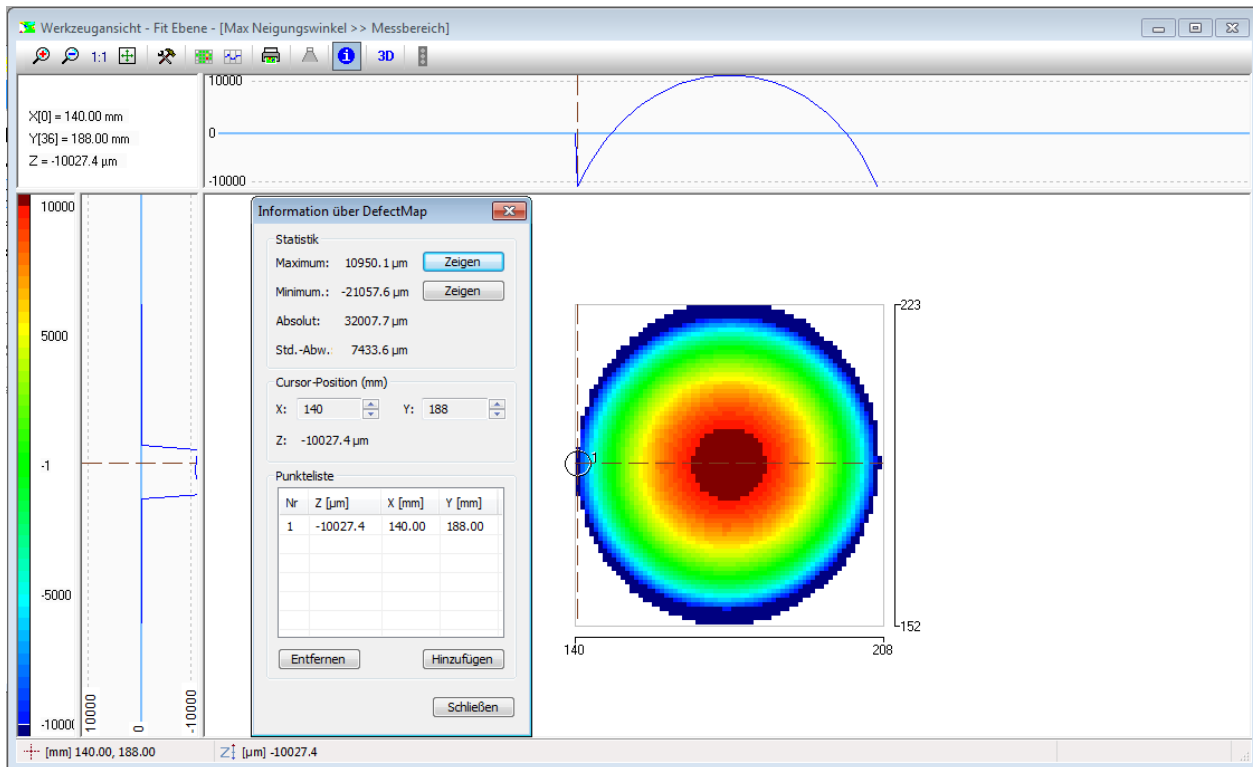


Abbildung 5: Ermittlung maximaler Neigungswinkel

Ausgabe des Punktes 1 mit Normalenvektor:

x	y	z	dx	dy	dz
140,0000	187,0000	-11,4542	-0,841994	-0,005044	0,539463

Berechnung des Winkels: $dxy = \sqrt{dx^2 + dy^2} = 0,842$ $\varphi_N = \text{atan}(dxy / dz) = 57,4^\circ$

Zu 5.x:

Parameter: Vorschub 20 mm/s
 Zeilenfrequenz 10 kHz
 Punktabstand 0.2 mm
 Berechnung über 250 Zeilen (50 mm des Ebenennormals)

Ermittlung 5.1 aus Zeilenfrequenz der Kameras: 10 ms (10 kHz)

Ermittlung 5.2 über Ausgabe auf der Kommandozeile Zeit vor Start calc3D.exe und nach Abarbeitung innerhalb der Batchdatei

```
echo %TIME%
calc3D.exe glv.ini
echo %TIME%
```

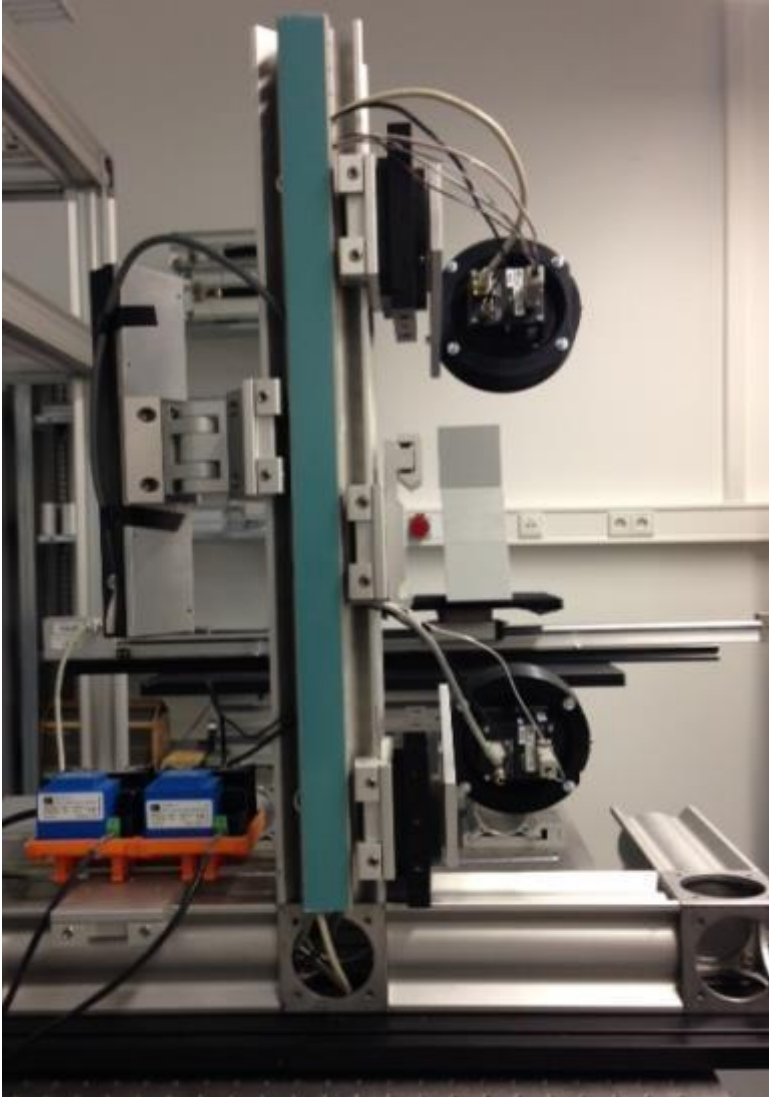
danach Differenzbildung Ende – Start

Dauer 250 Zeilen: 6,5 s (ca. Durchschnitt aus mehreren Durchläufen)

daraus Dauer 1 Zeile: 26 ms

Sensordatenblatt

#16

LINE	
Firma / Institution	INB Vision AG
Sensorfamilie / Modell	surfaceCONTROL2000-400Z (Speckle)
Verfahrens-Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion → Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Triangulationsverfahren mit Lichtprojektion,
	
Adresse	INB Vision AG Leipziger Straße 44, ZENIT II 39120 Magdeburg
Telefon	+49(0)391/6117-300
Email	info@inb-vision.com
www	www.inb-vision.com



Ausführliche Beschreibung

Zeilenkammeramesskopf

Bei diesem Sensor handelt es sich um ein aktives Stereo-Vision-System mit Zeilenkameras unter Verwendung von strukturiertem Licht. Die Zeilenkameras sind koplanar ausgerichtet, d.h. Objektpunkte im Messvolumen des Sensors werden unabhängig von ihren Koordinaten immer von beiden Zeilenkameras gesehen (**Abbildung 1**).

Um wie beim Streifenprojektionsverfahren Messpunkte im Kamerabild zu korrelieren, wird eine Mustersequenz projiziert und die Grauwertfolge einzelner Pixel miteinander verglichen.

Für die Berechnung der z-Koordinate muss der Messpunkt in beiden Kameras einer Pixelkoordinate zugeordnet werden. Hierzu wird die Sequenz der projizierten Muster genutzt. Der Messpunkt zeichnet sich in beiden Kameras durch eine identische Grauwertfolge in der Bildsequenz aus.

Für die 3D-Messung ist eine Relativbewegung zwischen Sensor und Messobjekt erforderlich.

Die Relativbewegung muss auf die Musterfrequenz abgestimmt sein, da sonst während der aufgenommenen Sequenz die Änderung am Messobjekt zu groß wird und in diesem Fall keine 3D-Punkte aufgenommen werden können.

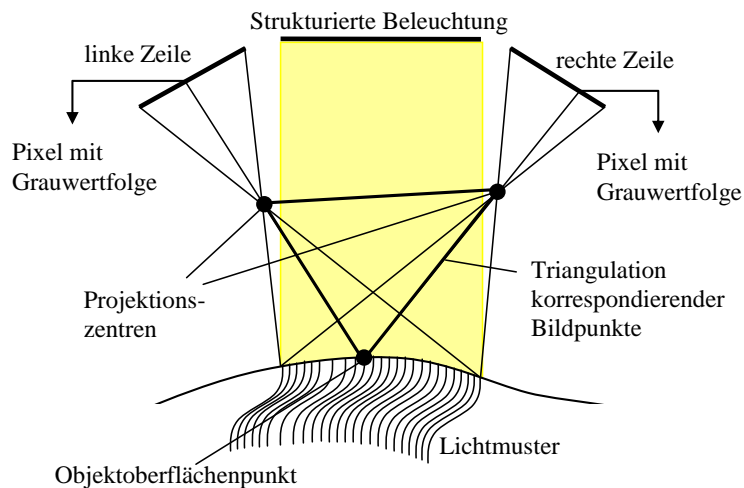


Abbildung 1: Beispiel für ein Zeilenkammerasensor in der Frontansicht

Strukturierte Zeilenbeleuchtung

Die strukturierte Beleuchtung muss sich durch eine hohe Intensität im Bereich der betrachteten Zeile sowie eine hohe Musterfrequenz auszeichnen. Aus diesem Grund wird eine strukturierte Linienbeleuchtung genutzt. Die Linienbeleuchtung wird gemeinsam mit den Zeilenkameras koplanar ausgerichtet.

Die Wechselfrequenz der Muster der strukturierten Beleuchtung muss mindestens so groß wie die Frequenz der Zeilenkamera sein. Bei der hier verwendeten Beleuchtungsart werden zur Strukturierung der Linie objektive Speckle genutzt die durch Laserlicht und eine sich drehende Streuscheibe erzeugt werden. Eine Synchronisierung der Muster mit den beiden Kameras erfolgt nicht. Die Wechselfrequenz der Muster hängt von der Drehgeschwindigkeit der Streuscheibe ab.

Entwicklungsstand des Verfahrens

Das Verfahren befindet sich derzeit in der Entwicklung. Die Untersuchungen erfolgten deshalb an einem Labordemonstrator. Es ist davon auszugehen, dass sich messtechnische und sonstige Parameter noch verbessern lassen.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	850 x 500 x 750	mm ³	
1.2	Gewicht	20	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	532	nm	
1.4	elektrische Leistung	k.A.	W	
1.5	Versorgung	~230V,	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	keine	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Laserklasse 3	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	k.A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	Gigabit Ethernet, RS232	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei (ASCII)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	X,(Y),Z (Y~t)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Linie: gleichabständig in x	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	2D Linienschnitt	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	nein	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D Oberflächenprüfung von diffus streuenden Oberflächen	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	365x[Vorschub]x100	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	0,65	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,540	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	-0,908	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	Nicht zutreffend	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,336	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,0056	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	Nicht bestimmt	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	720(Punkteabstand 0,5mm)	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	- , - , 39	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	- . - , 471	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	66,5	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	1	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	0,00153 / 0,00132	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	50	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	3.100	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	3.150	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	116	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	20	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0,3	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	Teledyne Dalsa SG-11-02K80	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	1D Zeile / (x)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	1x2048	px	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,100	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	10.000	fps	
7.3	Pixelrate	20.480.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)		lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	5..50	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	20..80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	0,0058 ... 0,0114	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	0,0295	mm	
9.3	Transluzenz		(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Lineartisch	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	<ul style="list-style-type: none"> - Zeilensensor, deshalb Linearverschiebung erforderlich - Labordemonstrator 	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF		(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	8 Stunden	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	Intel Core i7 M640 @2,8 GHz; 4 GB RAM; Windows 7, 64 Bit			

Anhang A

In der Anlage können individuelle Ergänzungswünsche zu einem konkreten Sensor-Beschreibung / Kenngrößen erfolgen.

Für die Auswertung der Messungen wurden einheitlich folgende Parameter gewählt:

V_{Linear} (Vortrieb der Lineareinheit) 20 mm/s

f_{Zeile} (Zeilenfrequenz) 10 kHz

Korrelation von jeweils 25 Zeilen

Zu 1.2:

X95-Profile: 750mm = 4,1kg; 2x 250mm = 2x 1,4kg;

sonstige Aufbauten: (2 Würfel, 2 Kameras/Halterungen, Reiter, Thorlabs Profilstange, geschätzt 13,1 kg

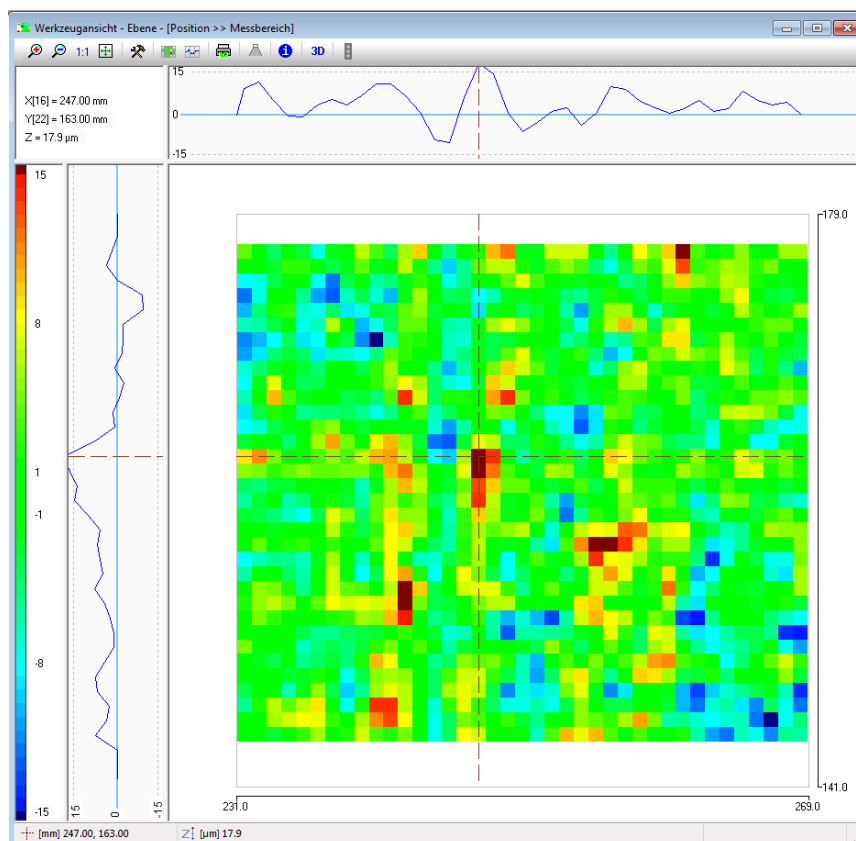
Zu 3.1: ermittelt basierend auf Messung 3.7

Zu 3.3: nur mit 5 Kugelpositionen ermittelt

Zu 3.4: nur mit 2 Positionen ermittelt, basierend auf Messung 3.3

Zu 3.6: Ebenheitsmessabweichung nur für drei Positionen ermittelt.

Zu 3.7: Auswertung basierend auf Datei „balken0“ aus Messung 3.6



Information über DefectMap

Statistik

Maximum: 17.9 μm Zeigen

Minimum.: -15.8 μm Zeigen

Absolut: 33.8 μm

Std.-Abw.: 5.6 μm

Cursor-Position (mm)

X: 247 Y: 163

Z: 17.9 μm

Punktliste

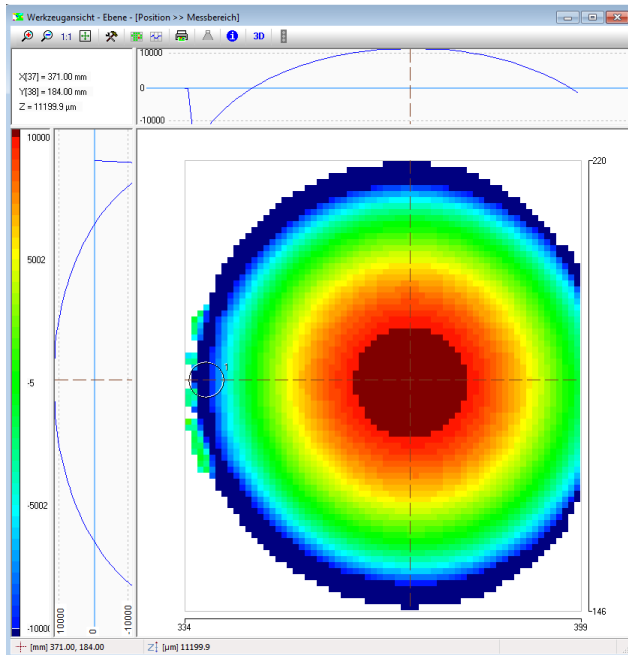
Nr	Z [μm]	X [mm]	Y [mm]

Entfernen
Hinzufügen

Schließen

Zu 3.9: Auswertung basierend auf Messung 3.6 – balken0

Zu 3.12 Auswertung basierend auf Messung 3.3 – measure001 (z=0mm)

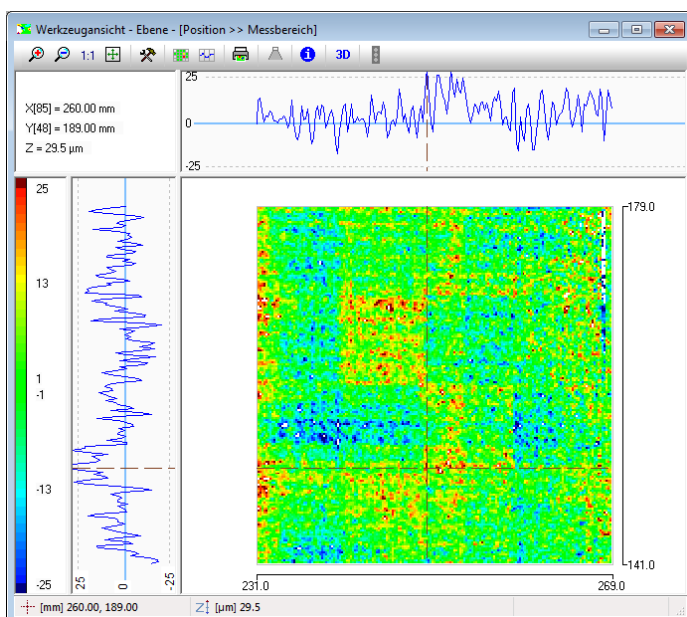


X	y	z	dx	dy	dz
337.000000	184.000000	-8.109200	-0.915851	0.046246	0.398846

Berechnung des Winkels: $dx_y = 0.917$ $\varphi_N = \tan(dx_y / dz) = 66,5^\circ$

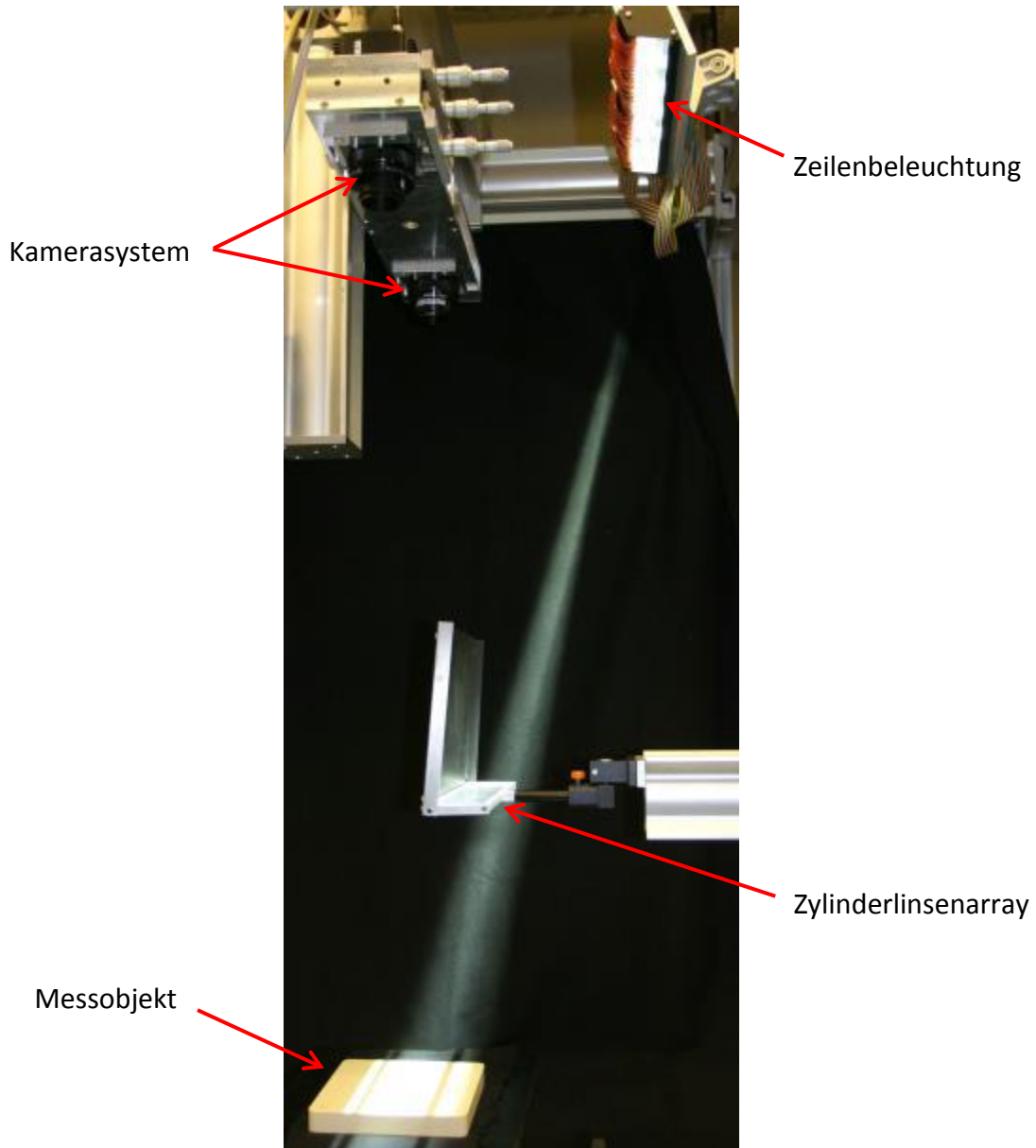
Zu 5.x mit Messung 3.7 ermittelt, Zeilenbreite 1 Pixel = 1mm, entspricht 500 Kamerazeilen; Suchbereich in z-Richtung: 100mm; bei kleinerem Suchbereich entsprechend schnellere Berechnung

Zu 9.2: Neben dem Übergang (siehe Fadenkreuz) sind die dunkleren Bereiche im mittleren Grauwert angehoben.



Sensordatenblatt

#17

Active 3D Line	
Firma / Institution	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Sensorfamilie / Modell	Active3DLine / PhS8-2x4K-44LEDs
Verfahrens-Einordnung	optische 3D-Oberflächenvermessung → Zeilenscanner → aktive Musterprojektion → Triangulation
Verfahrens-Präzisierung	- LED-Zeilenbeleuchtung mit Linsenarray - Phasenshift mit 8 Mustern
	
Adresse	Otto-von-Guericke-Universität, IIKT Universitätsplatz 2 39106 Magdeburg
Telefon	+49 391 67 18709
Email	ayoub.al-hamadi@ovgu.de
www	www.iikt.ovgu.de/nit.html



Ausführliche Beschreibung

Das Verfahren basiert auf der Konstruktion eines Stereo-Zeilenkamerasystems über einem Laufband bzw. einer Lineareinheit. Die Zeilenkameras sind so ausgerichtet, dass sie eine gemeinsame Sichtebene aufspannen, wodurch insbesondere die gleichzeitige Aufnahme korrespondierender Oberflächenpunkte gewährleistet wird. Die Berechnung von 3D-Oberflächenpunkten erfolgt durch Triangulation korrespondierender Bildpunkte innerhalb der aufgespannten Ebene, woraus mit jeder aufgenommenen Zeile ein Höhenprofil resultiert. Zusätzlich zur koplanaren Anordnung der Kameras werden Sensor und Projektionszentrum durch Objektivverschiebung so zueinander positioniert, dass beide Kameras den gleichen Tiefenschärfebereich abdecken. Die prinzipielle Messanordnung und das Triangulationsprinzip sind in Abbildung 1 dargestellt. Voraussetzung für die ordnungsgemäße Funktionsweise der Oberflächenrekonstruktion sind Justage und Kalibrierung der Zeilenkameras sowie der Lineareinheit zur Relativbewegung der Messoberfläche.

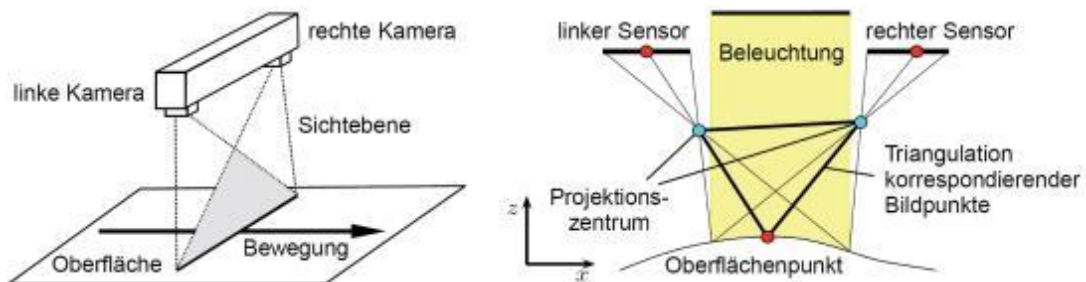


Abbildung 1: Messaufbau und Photogrammetrisches Prinzip

Zur aktiven Musterprojektion wird eine strukturierte Zeilenbeleuchtung eingesetzt. Sie basiert auf einem LED-Beleuchtungssystem für die 2D-Bildaufnahme, das für die Projektion von Lichtmustern in geeigneter Weise modifiziert wurde. Wie Abbildungen 2.a und 2.b zeigen, wird das von den LED's emittierte Licht in einer Dimension (y) gebündelt, während es sich in der anderen Dimension (x) gleichmäßig verteilt. Im Bereich der aufzunehmenden Zeile wird damit eine sehr intensive, zugleich aber auch homogene Beleuchtung erzielt. Wie Abbildung 2.c zeigt, besteht die Erweiterung zu diesem System darin, ein Feld von Zylinderlinsen in den Strahlengang der Zeilenbeleuchtung zu bringen, wodurch auf der Messoberfläche die Homogenität gebrochen wird und Streifenmuster orthogonal zur beleuchteten Zeile entstehen.

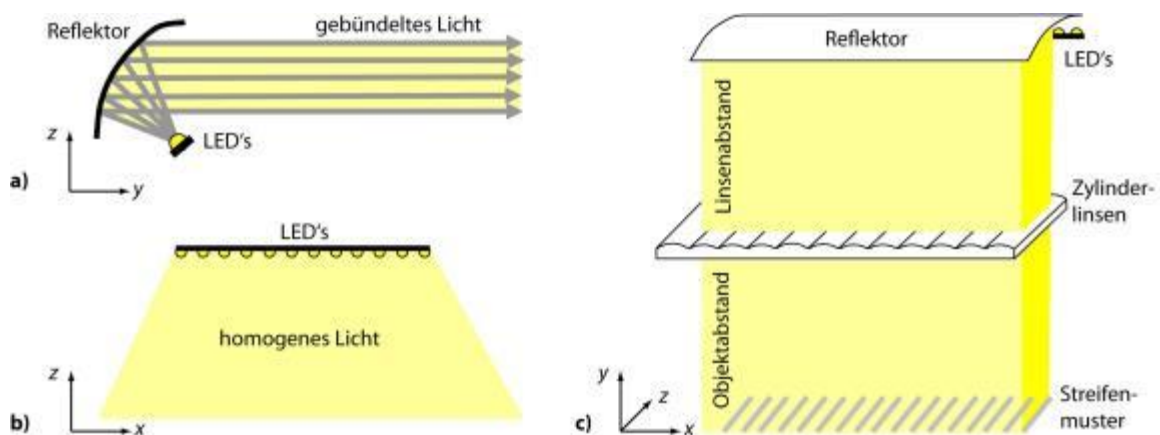


Abbildung 2: Aufbau strukturierte Zeilenbeleuchtung

Die Form der entstehenden Streifenmuster ist abhängig von

- der Breite und der Verteilung der LED's,
- von der Breite, der Verteilung und der Brennweite der Zylinderlinsen,
- der Distanz zwischen LED's und Linsenfeld (Linsenabstand),
- und der Distanz zwischen Linsenfeld und Objekt (Objektabstand).

Die Parameter lassen sich in einem beschränkten Höhenbereich (ca $\pm 3.5\text{mm}$) so wählen, dass Streifenmuster entstehen, die für eine photogrammetrische Auswertung mit dem Phasenshiftverfahren geeignet sind. Die phasenverschobenen Sinusmuster werden durch das elektronische Ein- und Ausschalten ausgewählter LED's erzeugt. Wie Abbildung 3 zeigt erfolgt die Messwerterfassung durch das Stereozeilenkamerasystem zeilensynchron bei entsprechender Bewegung der Messobjektoberfläche.

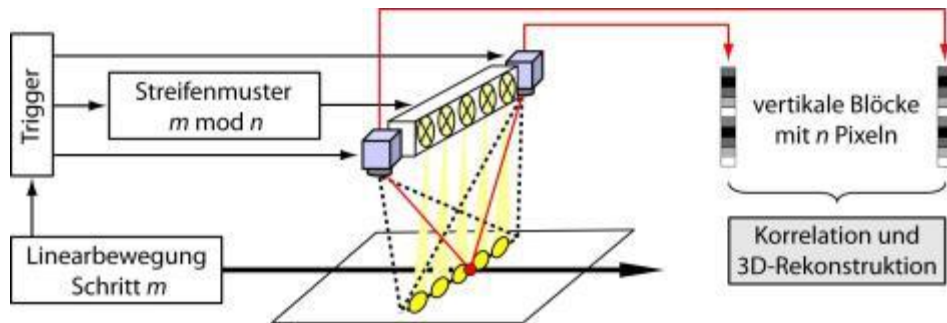


Abbildung 3: Musterprojektion, Bildaufnahme und Bildauswertung

Die Berechnung korrespondierender Pixel erfolgt über die Berechnung von Phasenwinkeln im linken und rechten Bild. Dabei werden jeweils vertikale Blöcke von n Pixeln ausgewertet. Sei $G_{u,v}$ der Grauwert eines Pixels (u, v) , dann ergibt sich der entsprechende Phasenwinkel aus

$$\varphi(u, v) = \arctan_2 \left(\sum_{i=1}^n \cos \left(\frac{2\pi i}{n} \right) G_{u,v+i}, \sum_{i=1}^n \sin \left(\frac{2\pi i}{n} \right) G_{u,v+i} \right)$$

Die Phasenwerte des zweiten Bildes werden analog berechnet. Die Korrespondenz zweier Bildpunkte in einer Zeile ist genau dann gegeben, wenn beide Phasenwerte übereinstimmen. Mehrdeutigkeiten sind dabei wegen des beschränkten Höhenbereichs ausgeschlossen.

Bemerkung:

Da sich das Verfahren momentan noch in der Entwicklung befindet, sind die ermittelten Parameter und Kenngrößen vorläufig. Es ist davon auszugehen, dass sich durch weitere Forschungen auf dem Gebiet noch erhebliche Verbesserungen ergeben.

Referenzen:

Lilienblum, E., Al-Hamadi, A. (2015): A Structured Light Approach for 3-D Surface Reconstruction With a Stereo Line-Scan System. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 64(5), 1266-1274.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	600 x 900 x 400	mm ³	
1.2	Gewicht	ca. 20 kg	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	sichtbares Licht	nm	
1.4	elektrische Leistung	125	W	
1.5	Versorgung	~230V, 1,0 A	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP20	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	k.A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	CameraLink	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei (ASCII)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	2D Linienschnitt	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	nein	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	1	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D Oberflächeninspektion diffus streuender Oberflächen	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	406 x [Vorschub] x 7	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	997.5	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0.2944 / 0.2299	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.0622	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	Nicht zutreffend	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.1792	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0.009874	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0.009014	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	4060(Punktabstand 0.1mm)	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	22.5	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	397.5	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	64.7	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	0.1	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	0.2218 / 0.2843	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	2	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	2.5	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	4.5	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	902222	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	500	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	222	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	DALSA P2-2X-04K40-10	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	1D Zeile / (x)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	4096	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,240	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	4000	fps	
7.3	Pixelrate	16384000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	k.A.	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	k.A.	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	k.A.	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	Farbe: nicht signifikant Helligkeit: 0,0099 – 0,2153	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	nicht signifikant (s. Anh.)	mm	
9.3	Transluzenz	k.A.	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	k.A.	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	k.A.	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	k.A.	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	k.A.	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	Intel Core i7 CPU 920 @267 GHz, 8 GB RAM, Win7 64 Bit			

Anhang A

Besondere Erläuterungen zu einigen Kenngrößen

Zu 3.1 und 3.9: Als Prüfkörper wurde eine am oberen bzw. unteren Rand des Messvolumens positionierte, matt-weiße, ebene Fläche (nicht zertifiziert) verwendet.

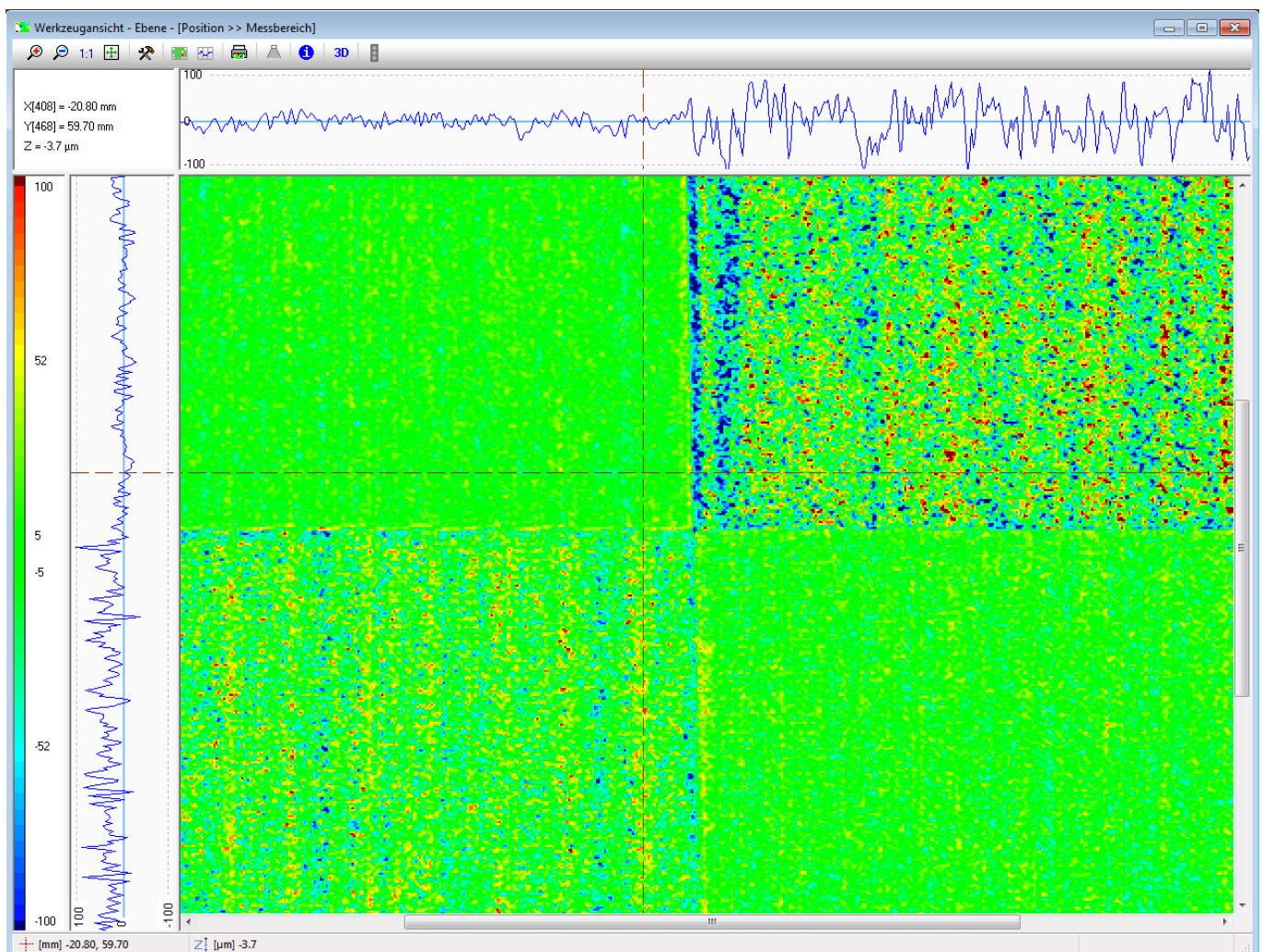
3.3 und 3.4 Wegen der geringen Messtiefe des Systems und der Dimensionalität des Verfahrens basieren die angegebenen Messwerte nur auf zwei Messungen. Für 3.4 wurde der Kugelstab vermessen. Für 3.3 wurde zusätzlich eine einzelne Kugel in der Mitte platziert. Die gemessenen Antastabweichungen sind im Wesentlichen auf Ungenauigkeiten der Zeilenvorschubeinrichtung zurückzuführen und sind daher für den eigentlichen 2D-Linienschnitt nicht relevant.

3.6 Wegen der geringen Messtiefe des Systems und der Dimensionalität des Verfahrens wurde hier nur eine Messung durchgeführt.

3.12 Die Messkugel wurde mittig im Messvolumen so platziert, dass nur der Rand der Kugel, der die entsprechenden Messwerte für den maximalen Neigungswinkel liefert, erfasst wird.

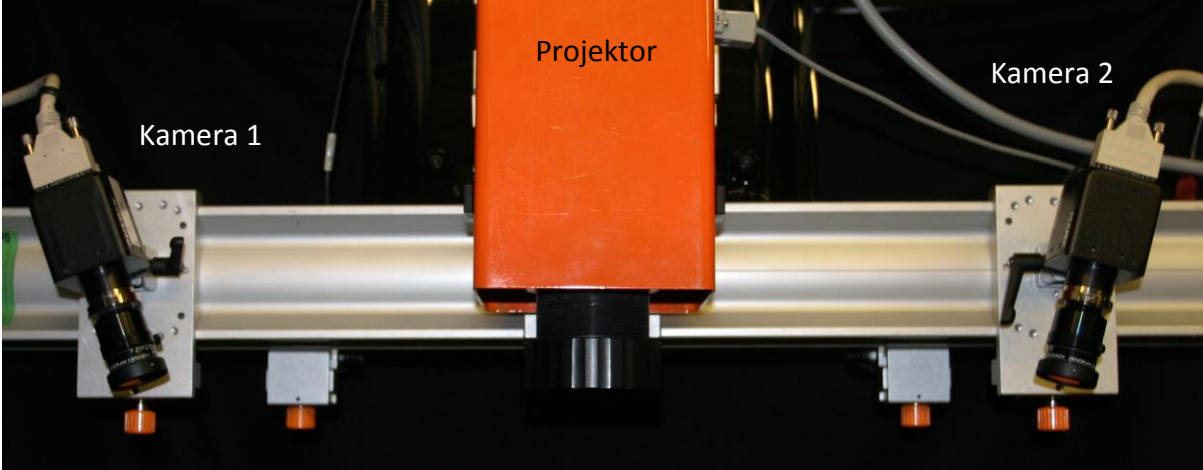



4.1 Die Messwerte wurden durch Best Fit eines Zylinders in die Kante berechnet.

9.2 Auswertung zum Hell/Dunkel-Übergang:



Sensordatenblatt

#18

Active 3D Matrix	
Firma / Institution	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Sensorfamilie / Modell	Active3DMatrix / MPS24-2x4M-ABW
Verfahrens-Einordnung	optische 3D-Oberflächenvermessung → Matrixkamera → aktive Musterprojektion → Triangulation
Verfahrens-Präzisierung	- Linienprojektion - Phasenshift mit 3 verschiedenen Streifenbreiten
	
Adresse	Otto-von-Guericke-Universität, IIKT Universitätsplatz 2 39106 Magdeburg
	  
Telefon	+49 391 67 18709
Email	ayoub.al-hamadi@ovgu.de
www	www.iikt.ovgu.de/nit.html

Ausführliche Beschreibung

Der Sensor besteht aus einer Konstruktion mit zwei Matrixkameras und einem Streifenlichtprojektor. Die 3D-Messwerte werden durch Triangulation korrespondierender Bildpunkte in beiden Kameras berechnet, wobei die Lösung des Korrespondenzproblems durch die Projektion verschiedener sinusförmiger Streifenmuster ermöglicht wird. Der Messaufbau mit aktiver Musterprojektion wird in Abbildung 1 dargestellt.

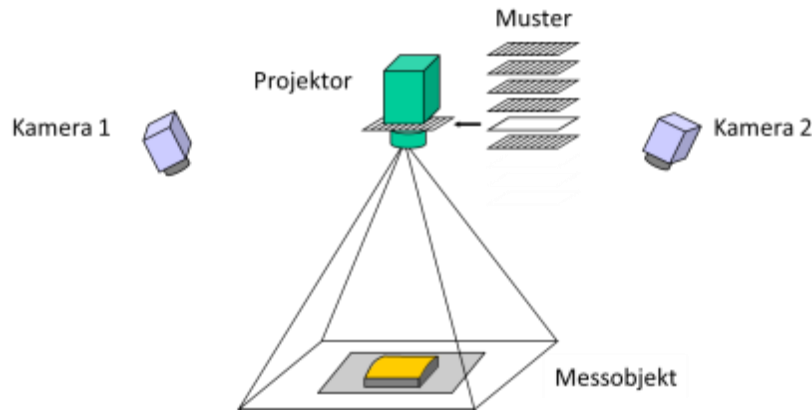


Abbildung 1: Messaufbau mit aktiver Musterprojektion

Der algorithmische Ansatz zur Lösung des Korrespondenzproblems besteht in der Anwendung des Phasenshiftverfahrens mit unterschiedlichen Streifenbreiten, wobei beim hier beschriebenen Sensor eine Kombination aus drei Streifenbreiten mit 7, 8 bzw. 9 phasenverschobenen Sinusmustern, d.h. insgesamt 24 Muster, benutzt wird. Die aufgenommenen Bilder werden pixelweise verarbeitet, wobei für jeden Pixel und jede Streifenbreite genau ein Phasenwert berechnet wird. Aus den drei entstehenden Phasenwerten wird eine Projektorkoordinate ξ berechnet, die Mehrdeutigkeiten prinzipiell ausschließt. In Abbildung 2 sind die Bilder der Phasenwerte bzw. Projektorkoordinaten für ein Testobjekt bestehend aus Kugeln verschiedener Größe dargestellt.

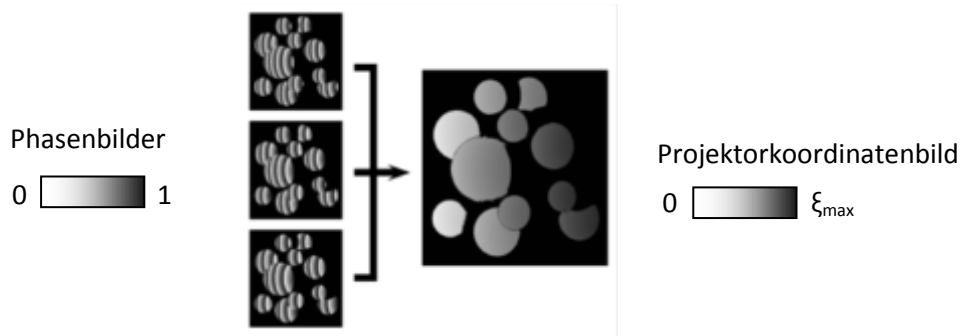


Abbildung 2: Phasenwerte und Projektorkoordinaten

Referenzen:

Lilienblum, E., Michaelis, B. (2007): Optical 3d surface reconstruction by a multi-period phase shift method. Journal of Computers, 2(2), 73-83.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	700 x 500 x 200	mm ³	
1.2	Gewicht	ca. 15 kg	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	sichtbares Licht	nm	
1.4	elektrische Leistung	300	W	
1.5	Versorgung	~230V, 1.5 A	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzstrom (Schuko)	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	IP20	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	k.A.	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	CameraLink, RS232	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei (ASCII)	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	Gitter: gleichabständig in x/y	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	nein	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D Oberflächeninspektion diffus streuender Oberflächen	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	266 x 293 150 Untere Ebene: 320 x 340	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	1000	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0.1086 / 0.1008	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.0771	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	Nicht zutreffend	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.174	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0.0151	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0.0159	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	2720000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	31.4	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	603.7	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	68.82	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.2	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	0.2372 / 0.2338	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	2400	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	11400	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	13800	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	197101	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	0.41	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0.072	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	PULNIX TM-4100CL	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / (x,y)	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 2048	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

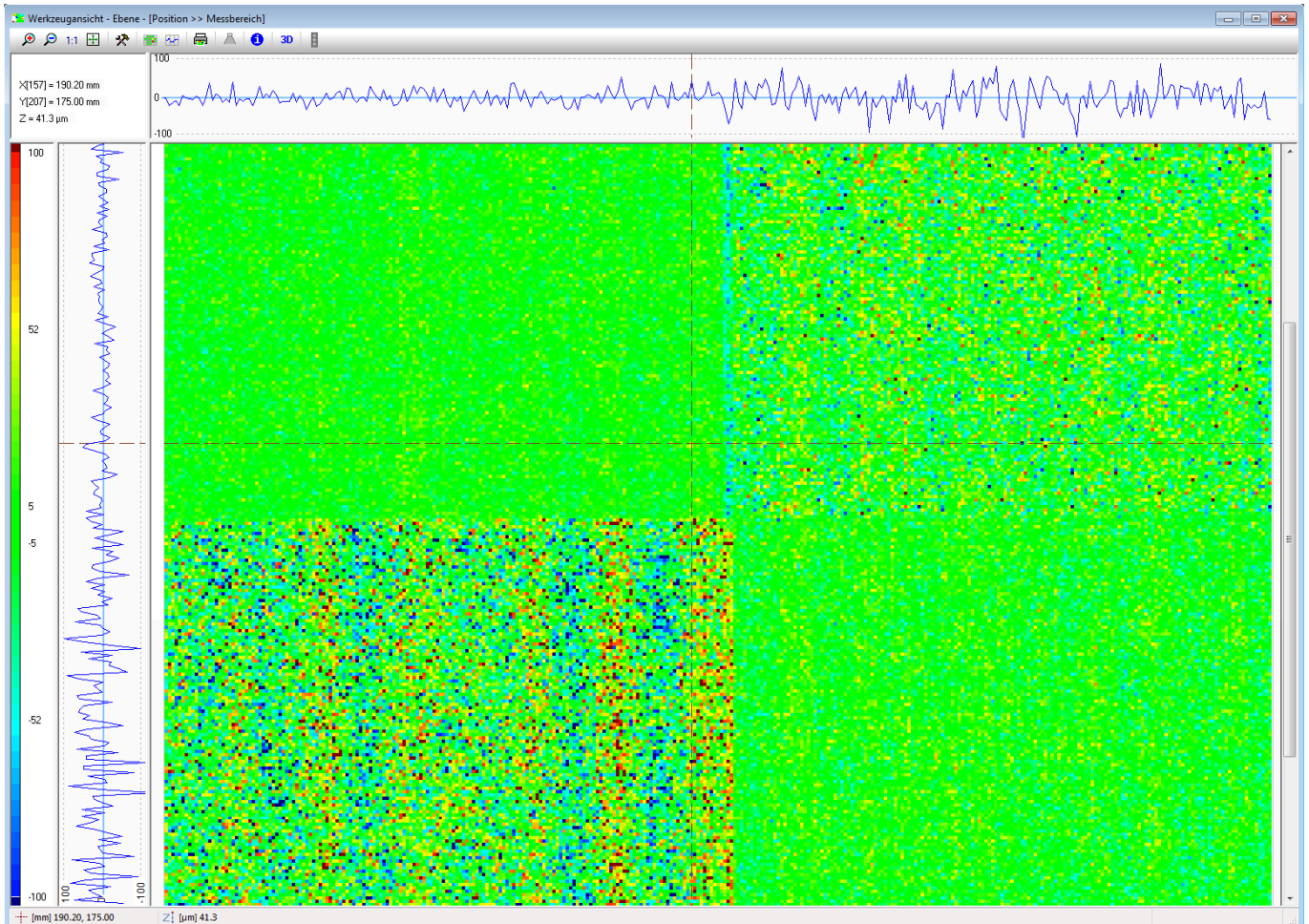
Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	80	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	12.5	fps	
7.3	Pixelrate	52428800	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	k.A.	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	k.A.	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	k.A.	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	Farbe: nicht signifikant Helligkeit: 0,014.9 – 0,090.6	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	nicht signifikant (s. Anh.)	mm	
9.3	Transluzenz	k.A.	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	k.A.	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	k.A.	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	k.A.	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	k.A.	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	Intel Core i7 CPU 920 @267 GHz, 8 GB RAM, Win7 64 Bit			

Anhang A

Besondere Erläuterungen zu einigen Kenngrößen

4.1 Die Messwerte wurden durch Best Fit eines Zylinders in die Kante berechnet.

9.2 Auswertung Hell/Dunkel-Übergang:



Sensordatenblatt

#19

3D Scanner mit diffraktiver Musterprojektion	
Firma / Institution	Siemens AG, Corporate Technology / Research and Technology Center
Sensorfamilie / Modell	Aktive Triangulation / Triple Shifted Stripe Sequence
Verfahrens-Einordnung	Optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion->Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Triangulationsverfahren mit diffraktiver Projektion kodierter Muster



Abbildung 1: Industrial 3D Scanner mit diffraktiver Musterprojektion

Adresse	Siemens AG, Corporate Technology RTC SET INT-DE Otto-Hahn-Ring 6 81739 München	
Telefon	+49 162 2645696	
Email	ludwig.listl@siemens.com	
www	http://www.siemens.com/innovation/de/home/corporate-technology.html	

Ausführliche Beschreibung

Triangulationsprinzip

Der beschriebene 3D- Sensor arbeitet zur Ermittlung der 3D-Oberflächenkoordinaten nach dem Triangulationsprinzip.

Dieses Verfahren ist eines der verbreitetsten Verfahren zur optischen Entfernungsmessung, da es besonders robust und kostengünstig realisierbar ist. Der grundlegende Aufbau besteht aus einer Lichtquelle als Sender und einem positionsempfindlichem Element oder einer Kamera als Empfänger, welcher das Messobjekt unter einem Betrachtungswinkel β anpeilt. Aus dieser Anordnung lässt sich anhand des Triangulationswinkels β und des Basisabstand b von Lichtquelle und Empfänger der Abstand des beleuchteten Objektpunkt von der Sensorebene bestimmen (Abbildung 2).

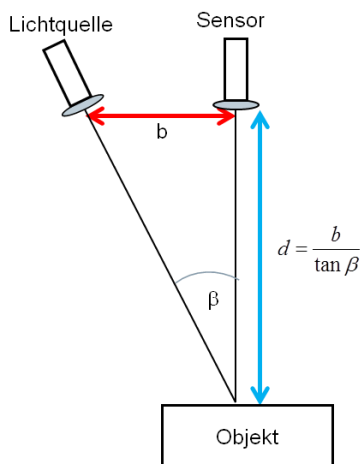


Abbildung 2 : Triangulationsprinzip

Aktives Triangulationsverfahren mit strukturiertem Licht

Bei aktiven Verfahren mit Streifenlichtprojektion beleuchtet ein Projektor das Objekt zeitlich sequentiell mit aus parallelen Linien bestehenden Mustern. Um die Streifen eindeutig unterscheiden zu können, werden sie kodiert. Eine Kamera zeichnet die Muster auf. Aus der Abfolge heller und dunkler Grauwerte lässt sich für jedes Kamerapixel die Nummer der korrespondierenden Lichtebeine eindeutig bestimmen. Dieses Prinzip des Zeitmultiplex erfordert jedoch die Auswertung mehrerer Bilder und erhöht somit die Aufnahmezeit. Das Verfahren lässt sich jedoch kostengünstig mit Hilfe von Standardkomponenten aus der Videotechnik realisieren.

Die Notwendigkeit mehrerer Bilder lässt sich z.B. durch die Verwendung paralleler Farbstreifen zur Kodierung der räumlichen Nachbarschaften eines Szenenpunktes vermeiden. Wenige nebeneinander liegende Farbstreifen definieren wie in Abbildung 3 gezeigt einen eindeutigen Code des Farbmusters.

Im ersten Schritt werden die Kanten der projizierten Farbstreifen detektiert, im zweiten Schritt wird der projizierte Farbcode im abgebildeten Muster aufgrund von lokalen Nachbarschaftsbeziehungen identifiziert und damit die 3D Information extrahiert.

Der zugrunde liegende Algorithmus basiert auf der Annahme stetiger Oberflächen und Reflexionseigenschaften, was für die meisten Objektbereiche zutrifft. Die projizierten Farbcodes können daher im Bild identifiziert, und die 3D-Koordinaten mittels Triangulation berechnet werden. An Oberflächensprüngen oder Flächen mit sich stark ändernder Reflektivität oder Farbe werden die 3D-Daten aus benachbarten Werten interpoliert, falls kein passender Code gefunden werden kann,

Wesentlicher Vorteil dieser Variante ist, dass dabei nur ein Muster projiziert werden muss, so

damit auch dynamische Szenen erfasst werden können. Die Ortsauflösung des codierten Lichtansatzes ist jedoch limitiert durch die Codelänge der projizierten Streifen.

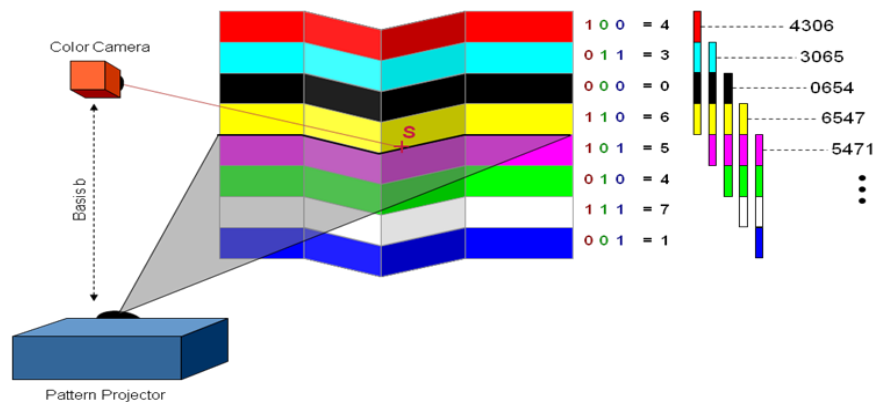


Abbildung 3 : Kodierte Farbmusterprojektion

Beim vorgestellten Sensor wird eine Variante des strukturierten Lichtansatzes umgesetzt. Dabei wird wie in Abbildung 4 gezeigt eine Folge von 3 kodierten Streifenmustern projiziert.

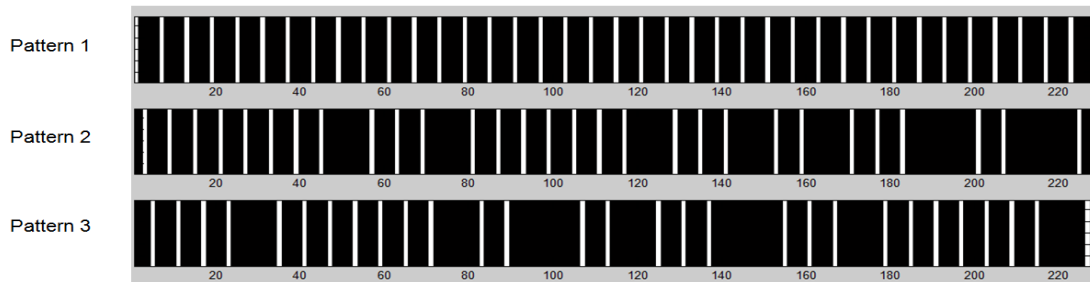


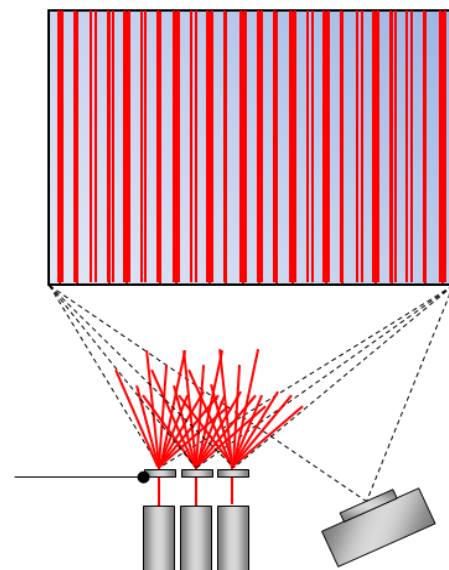
Abbildung 4 : Dreifach Mustersequenz

Die Muster wurden dabei so konstruiert, dass ein Optimum von Ortsauflösung und Eindeutigkeit bei der 3D- Rekonstruktion erreicht wird. Die Projektionseinheit wird dabei wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigt über diffraktive optische Elemente (DOE) realisiert, die eine hohe Lichteffizienz und kompakte Bauform bei geringen Herstellkosten ermöglichen.

Abbildung 5: Pattern Projektor mit monochromatischen Laser und diffraktiven optischen Elementen

Die Vorteile im Vergleich zum kodierten Farblichtansatzes sind:

- Signifikante Erhöhung der Datenpunktdichte
- Verwendung monochromatischen Lichtes
- hohe Robustheit bezüglich unterschiedlichen Oberflächen
- Umgebungslichtunterdrückung durch Verwendung angepasster Bandpassfilter
- Option der Streifenprojektion im (nahen) Infrarot
- Hohe Lichteffizienz der DOEs
- Geringe Leistungsaufnahme des Sensors
- Eignung als Handscanner / mobiler 3D Scanner



Referenzen:

- [1] Patrick Wissmann, Hand-Guided 3-D Scanning, Dissertation RTWH Aachen, 2013

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	260 x 80 x 110	mm ³	
1.2	Gewicht	1000	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	450 +/- 5	nm	
1.4	elektrische Leistung	3	W	
1.5	Versorgung	5V, 1A	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	USB 3.0, Steckernetzteil 230V	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	N/A	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	N/A (Prototyp)	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB3.0	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {XYZ,PLY, STL}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	x/y - Gitter	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Industrielle 3D Inspektion, 3D-Digitalisierung, Handscanner, Mensch- Maschine-Interaktion	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	400 x 250 x 500	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	400	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	600 / 180	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	500	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	N/A	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,950	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z)	0,141	mm	
3.8	zeitliches Rauschen in z-Richtung (σ_x)	0,0003	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	17400	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	12	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	190	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	62	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	0,430 / 0,450	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius	1.3 mm	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	30	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	70	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	100	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	1,7 Mio.	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	10	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	10	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	Ximea MQ022RG-CM	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2 / 0	(text)	

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.3	AuflöÙung (laut Hersteller)	2048 x 1088	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,600	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	170	fps	
7.3	Pixelrate	378 Mio.	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	Ca. 5000 (mit Filter)	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	0...+55	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	N/A	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	N/A	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten		(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	Monochromatische Beleuchtung Streifenprojektion mit diffractiven optischen Elementen NIR Option Bandpassfilterung von Umgebungslicht möglich Hohe Stabilität/Robustheit bei bewegten Szenen Sehr geringe Leistungs- aufnahme	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	N/A	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	< 0.1	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i7-3720QM /2,6GHZ: 24GB RAM / Windows 7 64 Bit / Grafik: Nvidia Quadro K1000M			

Sensordatenblatt

#20

Stereo Phase Shift 3D Scanner

Firma / Institution	Siemens AG, Corporate Technology / Research and Technology Center
Sensorfamilie / Modell	Active Triangulation / Stereo Phase Shift
Verfahrens-Einordnung	Optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion->Muster
Verfahrens-Präzisierung	Aktives Stereo Triangulationsverfahren mit Projektion phasenverschobener Muster und Gray Codes



Abbildung 1: Stereo Phase Shift Sensor



Abbildung 2: Komponenten des Sensors

Adresse	Siemens AG, Corporate Technology RTC SET INT-DE Otto-Hahn-Ring 6 81739 München	
Telefon	+49 162 2645696	
Email	ludwig.listl@siemens.com	
www	http://www.siemens.com/innovation/de/home/corporate-technology.html	

Ausführliche Beschreibung

Triangulationsprinzip

Der beschriebene 3D- Sensor arbeitet zur Ermittlung der 3D-Oberflächenkoordinaten nach dem Triangulationsprinzip.

Dieses Verfahren ist eines der verbreitetsten Verfahren zur optischen Entfernungsmessung, da es besonders robust und kostengünstig realisierbar ist. Der grundlegende Aufbau besteht aus einer Lichtquelle als Sender und einem positionsempfindlichem Element oder einer Kamera als Empfänger, welcher das Messobjekt unter einem Betrachtungswinkel β anpeilt. Aus dieser Anordnung lässt sich anhand des Triangulationswinkels β und des Basisabstand b von Lichtquelle und Empfänger der Abstand des beleuchteten Objektpunkt von der Sensorebene bestimmen (Abbildung 3).

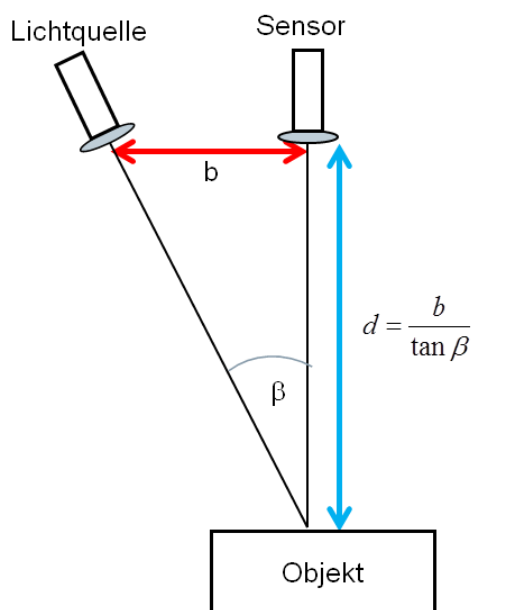


Abbildung 3: Triangulationsprinzip

Aktives Triangulationsverfahren mit Projektion phasenverschobener Muster (Phase Shift)

Bei aktiven Triangulationsverfahren mit Streifenlichtprojektion beleuchtet ein Projektor das Objekt zeitlich sequentiell mit aus parallelen Linien bestehenden Mustern. Um die Streifen eindeutig unterscheiden zu können, werden sie kodiert. Eine Kamera zeichnet die Muster auf. Aus der Abfolge heller und dunkler Grauwerte lässt sich für jedes Kamerapixel die Nummer der korrespondierenden Lichtebeine eindeutig bestimmen. Beim Phase Shift Verfahren wird ein sinusförmiges periodisches Muster in mehreren Schritten phasenverschoben auf das Objekt projiziert und aus der Aufnahmesequenz für jeden Objektpunkt die Phase des beobachteten Musters ermittelt.

Dieses Messverfahren wird in der Optik und Elektronik häufig verwendet, um die Phasenlage eines modulierten Signals durch punktweise Intensitätsmessungen zu bestimmen. Die Phasenlage des Signals wird mindestens zweimal um einen bekannten Wert räumlich oder zeitlich verschoben, während an einem Punkt die Intensität gemessen wird. Aus drei oder mehr Messwerten kann die Phase rekonstruiert werden. Zusätzliche Aufnahmen erhöhen die Robustheit des Verfahrens.

Für die Intensität eines einer Streifenposition im n -ten Streifenmuster gilt dabei:

$$I_n = I_0 \cdot (1 + A(x, y) \sin(\varphi(x, y) + \delta_n))$$

Mit I_0 : Intensität des Umgebungslichts

$A(x,y)$: Streifenmodulation

$\varphi(x,y)$: Phase

δ_n : Phasenverschiebung des Streifenmusters

Beim beschriebenen Sensor werden 4 jeweils um 90° phasenverschobene Muster projiziert (Abbildung 4). Damit ergibt sich für jedes Pixel die relative Phasenlage zu:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}$$

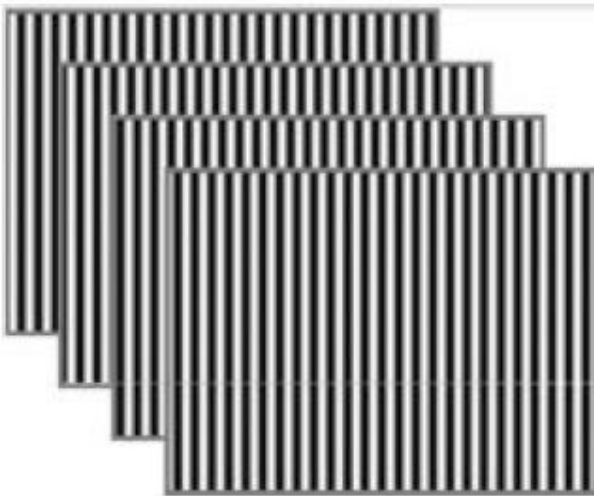


Abbildung 4: Projizierte Phasenmuster

Die Phaseninformation ist bei Verwendung von einer Wellenlänge nur innerhalb einer Periode eindeutig. Über Phase Unwrapping Verfahren muss die relative Phasenlage daher in die absolute Phase transformiert werden.

Das Phase Unwrapping erfolgt beim vorgestellten Sensor durch die Projektion von zusätzlichen Graycodes (Abbildung 5) in Kombination mit Stereo Matching Verfahren der beiden Kameras. Die hohe laterale Auflösung und Genauigkeit des Phasenschiebeprozesses wird dabei um die große Robustheit des Stereoansatzes gegenüber Unstetigkeiten ergänzt.

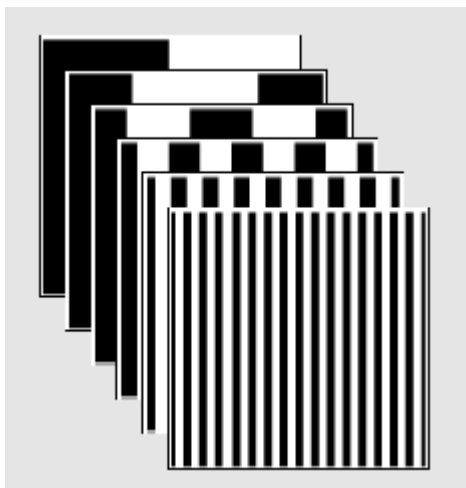


Abbildung 5: Graycodes

Phasenschiebverfahren werden typischerweise bei statischen Messbedingungen eingesetzt, d.h. bei Anwendungen mit festem Bezug zwischen Messeinrichtung und Messobjekt. Bei dynamischen Messbedingungen kann eine Relativbewegung zwischen Messobjekt und Messeinrichtung während der Aufnahmezeit zu einer verminderten Qualität der Messergebnisse führen.

Referenzen:

[1] Patrick Wissmann, Hand-Guided 3-D Scanning, Dissertation RTWH Aachen, 2013

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	310 x 100 x70	mm ³	
1.2	Gewicht	1400	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	visible 400 ... 750	nm	
1.4	elektrische Leistung	20	W	
1.5	Versorgung	5V/1A	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	USB 3.0, Steckernetzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	N/A	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	keine	(text)	
1.9	Sensorpreis (Preisspanne)	N/A (Prototyp)	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB 3.0	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {XYZ,PLY, STL}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(X,Y,Z, Intensität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	x/y – Gitter	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Industrielle 3D Inspektion, 3D Digitalisierung	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	300 x 170 x 400	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	400	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0,160 / 0,176	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0,164	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	N/A	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0,160	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z , räumlich)	0,022	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z , zeitlich)	0,0001	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	$2 \cdot 10^6$	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	11,5	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	220	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	67	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunktabstand (x / y)	0,220 / 0,220	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius (x y)	0,300 (Radius Best fit Zylinder)	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	900	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	1000	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	1900	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	$2 \cdot 10^6$	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	1,1	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	0,53	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	Ximea MQ022MG-CM	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2 / 0	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 1088	px	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	2	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	0,6	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	170	fps	
7.3	Pixelrate	378 Mio	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	700 lux (indoor)	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	-10...+55	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	80	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	Mittelwert: 0,083 Siehe Anhang	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	N/A	mm	
9.3	Transluzenz	nein	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten		(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors		(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	N/A	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	< 15 min	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i7-3720QM /2,6GHZ: 24GB RAM / Windows 7 64 Bit / Grafik: Nvidia Quadro K1000M			

Anhang A

In der Anlage können individuelle Ergänzungswünsche zu einem konkreten Sensor-Beschreibung / Kenngrößen erfolgen.

Kenngröße 9.1: Bestimmung Parameter „Textur Farbe/Grauwert“

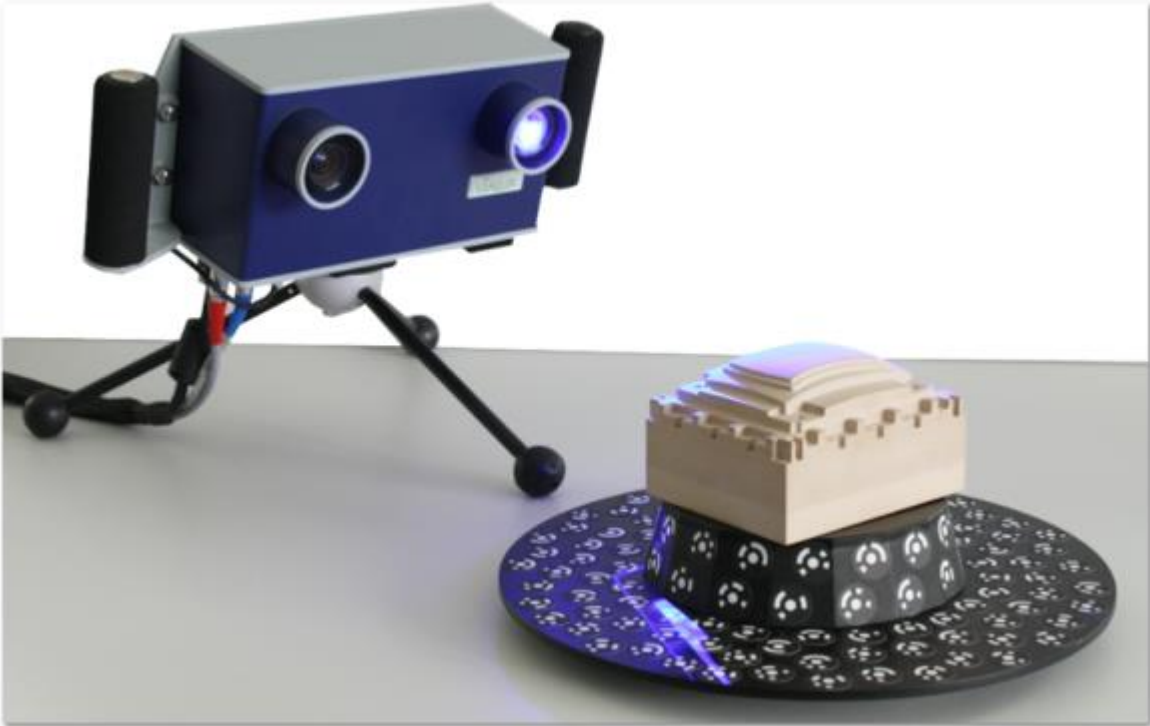
In jedem Farbfeld wird das lokale räumliche Rauschen gemäß Kenngröße 3.7 in einem Bereich von 10x10 mm² gemessen. Im Datenblatt ist der Mittelwert aller Felder angegeben. Abbildung 6 zeigt das Rauschen in mm der einzelnen Messfelder.



Abbildung 6: Räumliches Rauschen an farbigen Oberflächen

Sensordatenblatt

#21

zSnapper® 4M	
Firma / Institution	ViALUX GmbH
Sensor Familie / Modell	zSnapper®
Verfahrens Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion →Muster
Verfahrens Präzisierung	Phasenkodierte Photogrammetrie mit einem aktiven Mikrospiegelprojektor und einer CCD-Kamera.
	
Adresse	ViALUX GmbH Am Erlenwald 10 D-09128 Chemnitz
Telefon	+49 371 334247-0
Email	3D@vialux.de
www	www.vialux.de



Ausführliche Beschreibung

zSnapper@4M ist eine kompakte 3D Scan-Einheit für die hochaufgelöste Erfassung besonders detailreicher Objektoberflächen. Die Messung der 3D-Form basiert auf phasenkodierter Photogrammetrie, bei der mittels projizierter Mustersequenzen für jeden Bildpunkt der Kamera ein von der Nachbarschaft unabhängiges Koordinaten-Tripel ermittelt wird. Das mustergenerierende Element für die Projektion ist ein industrieller DLP® Mikrospiegel-Chipsatz von Texas Instruments, dessen Präzision in Verbindung mit Hochleistungs-LED Lichtquellen die neue wartungs- und verschleißfreie Solid-State Scanner-Generation ausmacht. Als autorisierter DLP Design House Partner von Texas Instruments greift ViALUX dabei auf eigene, DLP Controller-Lösungen zurück, die hinsichtlich Linearität und Synchronisation für die phasencodierte Photogrammetrie optimiert sind. Im Unterschied zu Linienscannern wird der sichtbare Objektbereich laserefrei und ohne mechanische Zusatzbewegung in nur einer Aufnahme vollflächig erfasst. Diese zuverlässige und präzise zSnapper® Technologie wird mit ausgereifter leistungsstarker Software kombiniert und ist für Aufgaben der Digitalisierung sowie Qualitätskontrolle attraktiv. 3D Aufnahmen werden auf Knopfdruck erfasst und innerhalb weniger Sekunden sind mehrere Perspektiven aufgenommen und visualisiert. Um komplette 360° Modelle zu erstellen, sind die Einzelmessungen zu einem Gesamtmodell zusammenzusetzen. Verschiedene Methoden stehen dafür in der zSnapper® Messsoftware zur Verfügung:

- Referenzierte Marken in der Umgebung des Objektes ermöglichen das automatische Einpassen der kompletten Punktwolke in ein vorgegebenes Koordinatensystem. Mit der Echtzeitvisualisierung des gemessenen Gesamtmodells ist der Scanfortschritt sofort ablesbar.
- Mehrere zSnapper@4M Scan-Einheiten können gekoppelt werden, um ein Messobjekt *simultan* aus mehreren Perspektiven gleichzeitig zu erfassen. Die Orientierung der Scan-Einheiten wird mit einer komfortablen Zusatzfunktion a priori bestimmt, so daß die Punkte aller Einzelmessungen von vornherein im gleichen Koordinatensystem liegen. Durch eine spezielle Hardware-Synchronisation aller DLP-Projektionssysteme erfolgt die Bildaufnahme quasi-simultan derart, daß eine störende Überlagerung der projizierten Muster verschiedener Scan-Einheiten ausgeschlossen ist.

Für die gemessenen 3D-Daten stehen verschiedene Exportformate zur Verfügung.

- ViALUX stellt dem Nutzer alle gemessenen Oberflächenkoordinaten in einem offenen Textformat bereit (.pct).
- Polygonale Oberflächenmodelle werden als .stl, .obj oder .vrmI exportiert.

Die pixelgenau zugeordnete s/w-Textur des gemessenen Objektes liegt in jedem Fall mit vor, zusätzliche Farbinformationen sind optional als Sondermodell auf Anfrage möglich.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	230 x 130 x 115	mm ³	
1.2	Gewicht	2300	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	462 +/-10	Nm	
1.4	elektrische Leistung	60	W	
1.5	Versorgung	12-24 V	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	Keine	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis	ab 16.000	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB2.0, IEEE1394b	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PCT,VLX3D}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(u,v,X,Z,Y, Grauwert, Q)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	u,v,-geordnete Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D (Oberflächenansicht)	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Bedarfsfeld Produktion	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	280 x 210 x 120	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	400	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	-	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.09	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.2	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_{τ} , räumlich)	0.023	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_{χ} , zeitlich)	0.018	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	4.000.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min / max / mean)	20 / 30 / 26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min / max / mean)	-	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	35	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.14 / 0.14	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius	0.19	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	400	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	100	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	500	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	8.000.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	2	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	2	fps	
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	KAI4021A	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / 16x16 mm ²	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 2048	px	

Sensor Datenblatt

Vorlagenvers.12/2015

Nr.	KenngroÙe	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene KenngroÙen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	20	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	16	fps	
7.3	Pixelrate	67.000.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	Innenraum ca. 600	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	10...40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	< 0.02 oder kein Messwert	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	ja	mm	
9.3	Transluzenz	< 0.02 oder kein Messwert	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Drehteller, Referenzkörper	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors		(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	10.000 h Messzeit ohne Service	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0.2	h	
Systemkonfiguration der KenngroÙen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i5 @ 2.4Ghz / RAM: 8GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 Pro			

Sensordatenblatt

#22

zSnapper®4M XS	
Firma / Institution	ViALUX GmbH
Sensor Familie / Modell	zSnapper®
Verfahrens Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion →Muster
Verfahrens Präzisierung	Phasenkodierte Photogrammetrie mit einem aktiven Mikrospiegelprojektor und einer CCD-Kamera.
	
Adresse	ViALUX GmbH Am Erlenwald 10 D-09128 Chemnitz
Telefon	+49 371 334247-0
Email	3D@vialux.de
www	www.vialux.de



Ausführliche Beschreibung (I)

zSnapper®4M XS kommt für die lateral hochaufgelöste 3D-Vermessung kleiner Objekte zum Einsatz. Innerhalb der zSnapper® 3D-Scanner Familie bietet das Gerät die höchste Präzision und eignet sich dadurch für besonders kleine Strukturen.

Die Messung der 3D-Form basiert auf phasenkodierter Photogrammetrie, bei der mittels projizierter Mustersequenzen für jeden Bildpunkt der Kamera ein von der Nachbarschaft unabhängiges Koordinaten-Tripel ermittelt wird. Das mustergenerierende Element für die Projektion ist ein industrieller DLP® Mikrospiegel-Chipsatz von Texas Instruments, dessen Präzision in Verbindung mit Hochleistungs-LED Lichtquellen die neue wartungs- und verschleißfreie Solid-State Scanner-Generation ausmacht. Als autorisierter DLP Design House Partner von Texas Instruments greift ViALUX dabei auf eigene, DLP Controller-Lösungen zurück, die hinsichtlich Linearität und Synchronisation für die phasencodierte Photogrammetrie optimiert sind. Im Unterschied zu Linienscannern wird der sichtbare Objektbereich laserfrei und ohne mechanische Zusatzbewegung in nur einer Aufnahme vollflächig erfasst. Diese zuverlässige und präzise zSnapper® Technologie wird mit ausgereifter leistungsstarker Software kombiniert und ist für Aufgaben der Digitalisierung sowie Qualitätskontrolle attraktiv. 3D Aufnahmen werden auf Knopfdruck erfasst, um komplette 360° Modelle zu erstellen, sind mehrere Ansichten nacheinander zusammensetzen. Referenzierte Marken in der Umgebung des Objektes ermöglichen das automatische Einpassen jeder erfassten Punktwolke in ein vorgegebenes Koordinatensystem. Die Software ermöglicht die unmittelbare Visualisierung der gemessenen Punktwolke, damit ist der Scanfortschritt direkt ablesbar.

Für die gemessenen 3D-Daten stehen verschiedene Exportformate zur Verfügung.

- ViALUX stellt dem Nutzer alle gemessenen Oberflächenkoordinaten in einem offenen Textformat bereit (.pct).
- Polygonale Oberflächenmodelle werden als .stl, .obj oder .vrmI exportiert.

Die pixelgenau zugeordnete s/w-Textur des gemessenen Objektes liegt in jedem Fall mit vor.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	330 x 425 x 280	mm ³	
1.2	Gewicht	3700	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	462 +/-10	nm	
1.4	elektrische Leistung	60	W	
1.5	Versorgung	12-24 V	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	Keine	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis	ab 17.000	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB2.0, IEEE1394b	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PCT, VLX3D}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(u,v,X,Z,Y, Grauwert, Q)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	u,v,-geordnete Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D (Oberflächenansicht)	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	nein	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Bedarfsfeld Produktion	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	120 x 90 x 10	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	170	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	-	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	-	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	0.013	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.2	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z , räumlich)	0.007	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_x , zeitlich)	0.009	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	4.000.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	25 / 35 / 30	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	30	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.06 / 0.06	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y) Kantenradius (Mittelwert)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius (x y)	0.19	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	400	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	100	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	500	ms	
5.4	Max. 3D Datenpunktrate	8.000.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten <kontinuierlich>	2	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	2	fps	
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	KAI4021A	(text)	

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / 16x16 mm ²	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	2048 x 2048	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	20	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	16	fps	
7.3	Pixelrate	67.000.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	Innenraum ca. 600	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	10...40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	< 0.02 oder kein Messwert	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	< 0.02 oder kein Messwert	mm	
9.3	Transluzenz	ja	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten		(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors		(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	10.000 h Messzeit ohne Service	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0.5	h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i5 @ 2.4Ghz / RAM: 8GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 Pro			

Sensordatenblatt

#23

zSnapper® cart	
Firma / Institution	ViALUX GmbH
Sensor Familie / Modell	zSnapper®
Verfahrens Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion →Muster
Verfahrens Präzisierung	Phasenkodierte Photogrammetrie mit einem aktiven Mikrospiegelprojektor und einer CCD-Kamera.
	
Adresse	ViALUX GmbH Am Erlenwald 10 D-09128 Chemnitz
Telefon	+49 371 334247-0
Email	3D@vialux.de
www	www.vialux.de



Ausführliche Beschreibung

zSnapper® cart ist ein mobiler 3D-Ganzkörperscanner, der sich durch seine leistungsfähige, präzise und zuverlässige Sensortechnologie für den Einsatz im Bereich der Medizin und Gesundheitspflege in besonderem Maße eignet. Die Messung der 3D-Form basiert auf phasenkodierter Photogrammetrie, bei der mittels projizierter Mustersequenzen für jeden Bildpunkt der Kamera ein von der Nachbarschaft unabhängiges Koordinaten-Tripel ermittelt wird. Das mustergenerierende Element für die Projektion ist ein industrieller DLP® Mikrospiegel-Chipsatz von Texas Instruments, dessen Präzision in Verbindung mit Hochleistungs-LED Lichtquellen die neue wartungs- und verschleißfreie Solid-State Scanner-Generation ausmacht. Als autorisierter DLP Design House Partner von Texas Instruments greift ViALUX dabei auf eigene, DLP Controller-Lösungen zurück, die hinsichtlich Linearität und Synchronisation für die phasencodierte Photogrammetrie optimiert sind. Die Geräte benutzen keine Laser und stellen somit keine Gefährdung für die Augen dar. In wenigen Millisekunden ist die Einzelaufnahme aufgenommen und sofort am PC visualisiert.

Die Scan-Einheit sowie der Messcomputer sind in einen Gerätewagen integriert, der frei bewegt werden kann und an jedem neuen Standort sofort einsatzbereit ist. Das Gerät ermöglicht dadurch einen neuen Grad an Mobilität, wie er von automatischen 3D-Ganzkörperscannern dieser Genauigkeitsklasse sonst nicht erreicht wird. Das komplette zSnapper® cart System ist in einem PKW transportierbar.

Um komplette 360° Modelle des Körpers zu erstellen, sind mehrere Ansichten erforderlich. Die zu vermessende Person steht dazu auf einer kontinuierlich bewegten Drehplatte, deren Position und Bewegungsachse a priori nicht bekannt sind. Das für zSnapper® cart optimierte Software-Plugin TURN3D misst fortlaufend mit hoher 3D-Wiederholrate, um die Bewegung des Körpers zu bestimmen und neu gemessene Oberflächenpunkte aus der Teilansicht zum Gesamtmodell hinzuzufügen. Nach Abschluss der 360°-Messung optimiert die Software das 3D-Modell automatisch. Die integrierte Auswertesoftware ermittelt Körpermaße vollautomatisch oder mit komfortablen Interaktionstools.

Für die zeitaufgelöste 4D-Messung ganzer Körper oder Körperteile mittels zSnapper® cart ist die Software Scan4D einsetzbar. Mit dem Scan4D Plugin werden Ganzkörper-Szenen mit einer 3D-Wiederholrate von 20 Hz über Minuten hinweg aufgenommen. Im Bereich der Medizin und Gesundheitspflege kommt diese Möglichkeit besonders bei der Analyse von Haltungsschäden oder Bewegungsabläufen zum Einsatz und bietet Anwendungsvorteile gegenüber statischen oder quasi-statischen 3D-Körperscans.

Für die gemessenen 3D-Daten stehen verschiedene Exportformate zur Verfügung.



- ViALUX stellt dem Nutzer alle gemessenen Oberflächenkoordinaten in einem offenen Textformat bereit (.pct).
- Polygonale Oberflächenmodelle werden als .stl, .obj oder .vrmf exportiert.
- Besonders für die medizinische Anwendung unterstützt die ViALUX-Software Slice-Modelle (.aop).
- Die pixelgenau zugeordnete s/w-Textur des gemessenen Objektes liegt in jedem Fall mit vor.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	570 x 540 x 1200	mm ³	
1.2	Gewicht	22500	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	462 +/-10	nm	
1.4	elektrische Leistung	180 W	W	
1.5	Versorgung	220 V	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	Keine	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis	ab 12.700	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB2.0, IEEE1394b	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PCT,AOP,STL}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(u,v,X,Z,Y,Textur,Qualität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	u,v,-geordnete Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	ja	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	3D/4D-Vermessung von Körpern oder Körperteilen zu medizinischen Zwecken	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	1850 x 1300 x 900	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	1800	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	-	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.5	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	1.25	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_T , räumlich)	0.3	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_X , zeitlich)	0.8	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	75.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	10 / 15 / 13	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	50	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.8 / 0.8	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	50	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	3	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	53	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	3.500.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	20	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	20	fps	
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	KAI340A	(text)	

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / 4.74x3.55mm ²	(text)	
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	640x480	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	6	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	400	fps	
7.3	Pixelrate	15.360.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	600	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	10...35	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	< 0.3 oder kein Messwert	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	< 0.3 oder kein Messwert	mm	
9.3	Transluzenz	ja	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Personen-Drehteller	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	unterstützt Rundum- messung oder alternativ 4D-Video-Betrieb	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	>10.000 h Messzeit ohne Service	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0.5	h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i5 @ 2.4Ghz / RAM: 8GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 Pro			

Sensordatenblatt

#24

zSnapper® portable	
Firma / Institution	ViALUX GmbH
Sensor Familie / Modell	zSnapper®
Verfahrens Einordnung	optische 3D Vermessung → Triangulation → aktiv → Projektion →Muster
Verfahrens Präzisierung	Phasenkodierte Photogrammetrie mit einem aktiven Mikrospiegelprojektor und einer CCD-Kamera.
	
	
Adresse	ViALUX GmbH Am Erlenwald 10 D-09128 Chemnitz
Telefon	+49 371 334247-0
Email	3D@vialux.de
www	www.vialux.de



Ausführliche Beschreibung

zSnapper® *portable* ist eine kompakte, handliche 3D Scan-Einheit, die in kürzester Messzeit die 3D-Oberflächenkoordinaten der Messobjekte präzise erfasst. Die Messung der Oberflächen basiert auf phasenkodierter Photogrammetrie, bei der mittels projizierter Mustersequenzen für jeden Bildpunkt der Kamera ein von der Nachbarschaft unabhängiges Koordinaten-Tripel ermittelt wird. Das mustergenerierende Element für die Projektion ist ein industrieller DLP® Mikrospiegel-Chipsatz von Texas Instruments, dessen Präzision und Flexibilität in Verbindung mit Hochleistungs-LED Lichtquellen die neue wartungs- und verschleißfreie Solid-State Scanner-Generation ausmacht. Als autorisierter DLP Design House Partner von Texas Instruments greift ViALUX dabei auf eigene, hocheffektive DLP Controller-Lösungen zurück.

Die Geräte benutzen keine Laser und stellen somit keine Gefährdung für die Augen dar. Im Gegensatz zu Linienscannern wird der sichtbare Objektbereich ohne mechanische Zusatzbewegung in nur einer Aufnahme vollflächig erfasst. Diese zuverlässige und präzise zSnapper® Technologie ist für eine Vielzahl von Anwendungen attraktiv. 3D Aufnahmen werden auf Knopfdruck erfasst und verschiedene Ansichten sofort automatisch zusammengesetzt. Die zSnapper® Software beinhaltet ein leistungsfähiges Visualisierungstool, welches die Funktionalität aktueller Grafikplattformen für die Echtzeitdarstellung der 3D-Punktwolken effektiv nutzt. Der handgehaltene Betrieb ist besonders für medizinische Applikationen vorteilhaft. In wenigen Millisekunden ist die Einzelaufnahme aufgenommen und zeitgleich am PC visualisiert. Um komplette 360° Modelle zu erstellen, sind mehrere Ansichten nacheinander zusammenzusetzen. Verschiedene Methoden stehen dafür in der Messsoftware zur Verfügung.

- Referenzierte Marken in der Umgebung des Objektes ermöglichen das automatische Einpassen der kompletten Punktwolke in ein vorgegebenes Koordinatensystem. Mit der Echtzeitvisualisierung der gemessenen Punktwolke ist der Scanfortschritt sofort ablesbar.
- Regellose Marken werden direkt auf das Objekt appliziert, falls keine Referenzmarken zum Einsatz kommen sollen und das geometriebasierte Zusammensetzen nicht anwendbar ist, d.h. auf ebenen oder sphärischen Objektoberflächen. In diesem Fall werden zunächst alle Ansichten des Objektes erfasst und danach in einem Schritt automatisch zusammengesetzt.
- Völlig ohne Marken arbeitet der *Fusion Mode*. In Video-Echtzeit erfolgt das Zusammensetzen gemessener Punktwolken mit Hilfe eines geometriebasierten best-fit Algorithmus. Für diese Betriebsart sind keinerlei Marken auf dem Objekt erforderlich und das Ergebnis ist unmittelbar als 3D-Modell sichtbar. Eine leistungsfähige Ausgleichsrechnung sichert das genaue Ausrichten der Einzelaufnahmen für ein nahtloses Gesamtmodell.
- Mehrere zSnapper® *portable* Scan-Einheiten können gekoppelt betrieben werden, um ein Messobjekt *simultan* aus mehreren Perspektiven gleichzeitig zu erfassen. Die Orientierung der der Scan-Einheiten wird mit einer komfortablen Zusatzfunktion a priori bestimmt, so daß die Punkte alle Einzelmessungen von vornherein im gleichen Koordinatensystem liegen. Durch eine spezielle Kopplung aller DLP-Projektionssysteme erfolgt die Bildaufnahme quasi-simultan, aber ohne genseitige Überlagerung der projizierten Muster. Die Messzeit des Scanner-Ensembles ist dadurch nicht verlängert, sondern entspricht derjenigen eines Einzelscans.

Die hohe Aufnahme- und Verarbeitungsgeschwindigkeit des zSnapper® *portable* ermöglicht nicht nur die Messung sich bewegendender Objekte sondern darüber hinaus die Erfassung ganzer Zeitreihen veränderlicher 3D-Oberflächenformen. Mit dem Software Plugin *Scan4D* werden Szenen mit einer zeitlichen Auflösung von 21 ms, d.h. einer 3D-Wiederholrate von 46 Hz über Minuten hinweg aufgenommen.

Im Bereich der Medizin und Gesundheitspflege kommt diese Möglichkeit besonders vorteilhaft zum Einsatz, wobei oftmals mehrere Scan-Einheiten synchron arbeiten.

Für die gemessenen 3D-Daten stehen verschiedene Exportformate zur Verfügung.

- ViALUX stellt dem Nutzer alle gemessenen Oberflächenkoordinaten in einem offenen Textformat bereit (.pct).
Polygonale Oberflächenmodelle werden als .stl, .obj oder .vml exportiert.
- Besonders für die medizinische Anwendung unterstützt die ViALUX-Software Slice-Modelle (.aop).
- Die pixelgenau zugeordnete s/w-Textur des gemessenen Objektes liegt in jedem Fall mit vor, zusätzliche Farbinformationen sind optional als Sondermodell auf Anfrage möglich.

Sensorkenngrößen				
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Gerätebeschreibung				
1.1	Abmessungen (BxHxT)	230 x 130 x 115	mm ³	
1.2	Gewicht	2300	g	
1.3	Wellenlänge und Bandbreite	462 +/-10	nm	
1.4	elektrische Leistung	60	W	
1.5	Versorgung	12-24 V	V/A/bar	
1.6	Art der Versorgung	Akku oder Netzteil	(text)	
1.7	IP Schutzklasse	Keine	(text)	
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen	Keine	(text)	
1.9	Sensorpreis	ab 9.150	€	
1.10	Technische Schnittstellen/Protokolle	USB2.0, IEEE1394b	(text)	
1.11	Logische Schnittstellen/Datenformate	Datei {PCT,STL,OBJ,WRL}	(text)	
1.12	Komponenten eines Datenpunktes	(u,v,X,Z,Y,Textur,Qualität)	(text)	
1.13	Struktur der Datenpunkte	u,v,-geordnete Punktwolke	(text)	
Funktionsbeschreibung				
2.1	Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2)	3D Oberflächenansicht	(text)	
2.2	zusätzlich benötigte Messmittel	keine	(text)	
2.3	zusätzliche Bewegungsachsen	0	Anzahl	
2.4	Rundumsicht	ja	{ja,nein}	
2.5	typische Einsatzfelder	Gesundheit / Produktion	(text)	
Messtechnische Kenngrößen 3D				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	280 x 210 x 120	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	400	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0.1 / 0.05	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.2	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.2	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_z , räumlich)	0.02	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_x , zeitlich)	0.04	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	300.000	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	20 / 30 / 26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	55	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.4 / 0.4	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius (x y)	0.41	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	40	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	10	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	50	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	7.680.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	25	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	25	fps	
Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.1	Modell-/Typenbezeichnung	KAI340A	(text)	
6.2	Dimension (Dim. / Achsen)	2D Matrix / 4.74x3.55mm ²	(text)	

Nr.	Kenngröße	Werte	Einheit	Prüfkörper
Technische Daten eines elementaren Bildgebers				
6.3	Auflösung (laut Hersteller)	640x480	px	
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber	1	Anzahl	
Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers				
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme	2	ms	
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme	200	fps	
7.3	Pixelrate	61.440.000	px/s	
Umgebungseinfluss				
8.1	Fremdlicht (max. dc)	600	lx	
8.2	Zulässige Betriebstemperatur	10..40	°C	
8.3	Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte	nicht kondensierend	%	
Materialeinfluss (Messobjekt)				
9.1	Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z Rauschen)	< 0.05 oder kein Messwert	mm	
9.2	Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z)	< 0.05 oder kein Messwert	mm	
9.3	Transluzenz	ja	(text)	
Sonstiges				
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten	Vielseitig konfigurierbar, Handgehalten und/oder stativbasiert, Drehteller, Referenzkörper	(text)	
10.2	Besonderheiten des Sensors	4D-Video-Betrieb, synchrone Kombination von ≤ 6 Scaneinheiten möglich	(text)	
10.3	Serviceintervall und MTBF	>10.000 h Messzeit ohne Service	(text)	
10.4	Zeit für Inbetriebnahme	0.2	h	
Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung				
11.1	CPU: Intel i5 @ 2.4Ghz / RAM: 8GB DDR3-1600 / OS: Windows 7 Pro			

Anhang A

Die Software für den Sensor zSnapper® portable ermöglicht ein Umschalten auf die Betriebsart „High-Speed“, mit der bei verringerter Messpunktedichte kürzere Messzeiten und höhere 3D-Wiederholraten erreicht werden, was besonders im Bedarfsfeld „Gesundheit“ Vorteile bietet. Die in dieser Betriebsart ermittelten messtechnischen Kenngrößen sind nachfolgend aufgeführt und die Abweichungen zum obigen Datenblatt hervorgehoben.

Messtechnische Kenngrößen 3D für die Betriebsart „High-Speed“				
3.1	3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT)	280 x 210 x 120	mm ³	
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung	400	mm	
3.3	Antastabweichung (P_F / P_S)	0.4 / 0.05	mm	
3.4	Kugelabstandsabweichung (SD)	0.2	mm	
3.5	Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1	-	mm	
3.6	Ebenheitsmessabweichung (F)	0.38	mm	
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_T , räumlich)	0.03	mm	
3.8	Lokales Rauschen in z-Richtung (σ_X , zeitlich)	0.11	mm	
3.9	Max. Datenpunkte je Messung	76.800	pt	
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel (min/max/mean)	20 / 30 / 26	Grad	
3.11	Mittlere Basislänge (min/max/mean)	-	mm	
3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche (φ_N)	55	Grad	
3.13	Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y)	0.8 / 0.8	mm	
Kenngrößen zu kleinsten Strukturen				
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y) Kantenradius (Mittelwert)	-	mm ⁻¹	
4.2	Grenzradius (x y)	0.41	mm	
Zeitbezogene Kenngrößen 3D				
5.1	Messzeit pro 3D Einzelansicht	22	ms	
5.2	Latenzzeit pro 3D Einzelansicht	3	ms	
5.3	Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht	25	ms	
5.4	3D-Datenpunktrate (max.)	3.500.000	pt/s	
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten	46	fps	
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten	46	fps	