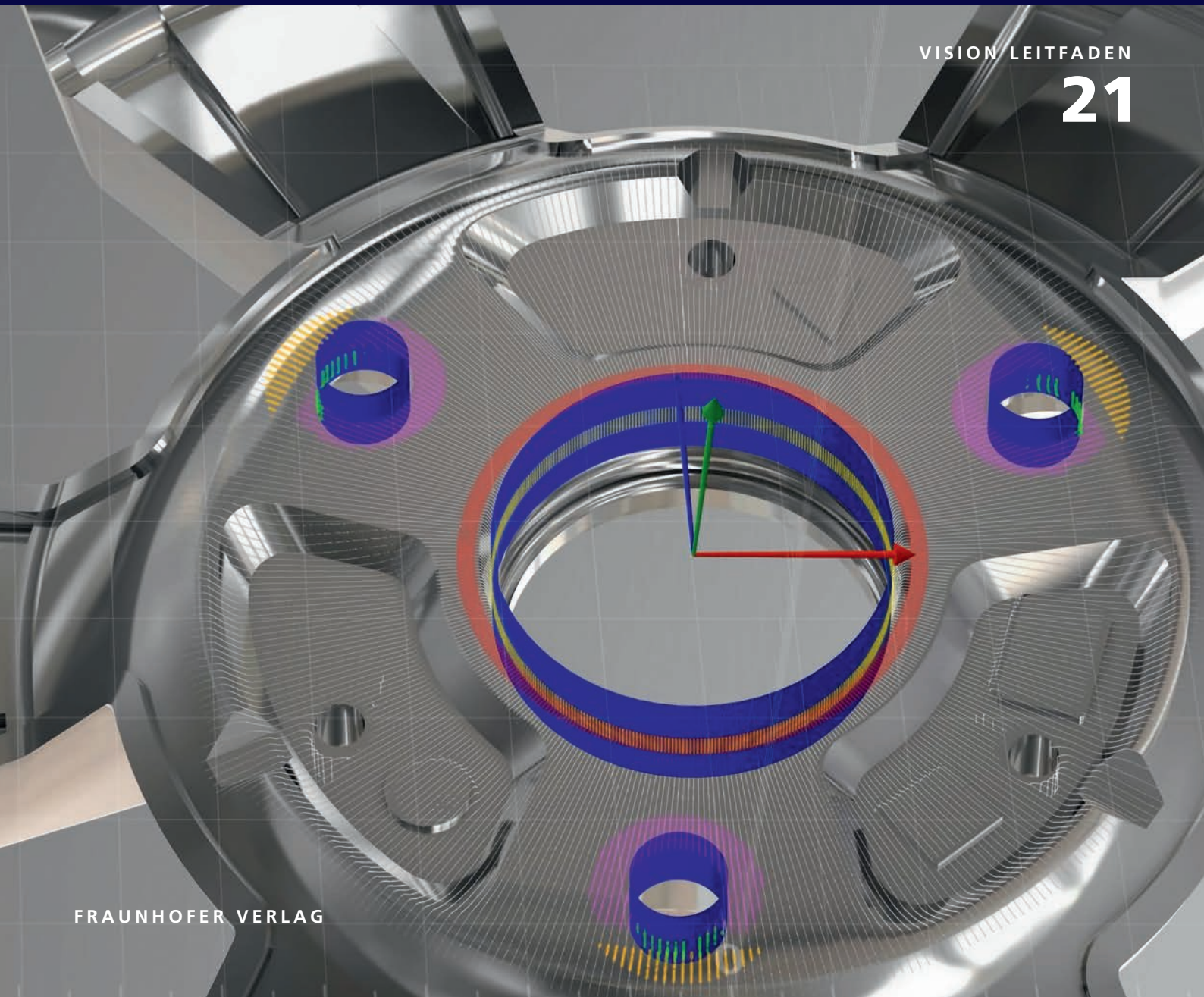


GESCHÄFTSBEREICH VISION

LEITFADEN ZUR OPTISCHEN 3D-MESSTECHNIK

VISION LEITFADEN

21



Fraunhofer Vision – Lösungen für maschinelles Sehen

Bildverarbeitung und berührungslose Mess- und Prüftechnik werden heute über alle Stufen der industriellen Wertschöpfung erfolgreich eingesetzt. Wenn auch als »Hidden Technology« meist gar nicht erkennbar, sind sie häufig die treibende Kraft für vielfältige Neuerungen und avancieren zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor.

Im besonderen Fokus vieler Anwenderbranchen stehen dabei innovative optische 3D-Technologien zum Messen, Prüfen und Führen. Ihr Einsatz unterstützt die Entwicklung und Qualifizierung neuer Produkte, sie dienen der Absicherung und Objektivierung von Herstellungsprozessen, finden Anwendung zur Digitalisierung von Objekten beispielsweise für 3D-Druck oder Reverse-Engineering oder als leistungsstarkes Werkzeug für die zerstörungsfreie Prüfung. Im Trend liegen fertigungsintegrierte Systeme, die schnelle Regelkreise im Takt der Produktion und die Umsetzung von Null-Fehler-Konzepten zur Qualitätssicherung ermöglichen.

Ein wachsendes Anwendungsgebiet für optische 3D-Technologien sehen Experten beim gezielten Greifen, beispielsweise beim Roboterhandling, wenn es darum geht, unsortierte Bauteile in beliebiger Lage zu erkennen und in ihrer Position und Orientierung im Raum genau zu erfassen.

Dazu passt ein weiteres Zukunftsfeld: die Echtzeiterkennung sich bewegender Objekte. Eine Entwicklung dafür sind zum Beispiel echtzeitfähige 3D-Kameras, die mit dem Lichtlaufzeitverfahren Distanzen messen und so eine ganze Szene mit sich bewegenden Objekten auf einmal räumlich erfassen können. Im Bereich hochdynamischer Verfahren zur dreidimensionalen Objektvermessung können heute 3D-Raten von mehreren Kilohertz erreicht werden. Auf diese Weise lassen sich auch extrem schnellere Vorgänge, wie sie etwa bei Crashtests oder der Entfaltung realer Fahrzeug-Airbags auftreten, geometrisch erfassen und analysieren.

Die Leistungsfähigkeit und der Spektralbereich der zur Datengewinnung eingesetzten 3D-Sensoren werden dabei immer größer und die Kombination unterschiedlicher Sensortypen vielfältiger. Enorme Fortschritte in der Bildsensorik erlauben ständig mehr Modalitäten und klassische Grenzen optischer Bildaufnahmetechniken werden überwunden.

Mit der dritten Dimension sieht man einfach besser. So werden ständig neue Anwendungsfelder für die optische 3D-Messtechnik erschlossen.

Die renommierte Fraunhofer Vision-Leitfaden-Reihe blickt inzwischen auf eine mehr als 20-jährige Geschichte zurück. Jährlich ist ein Band zu einem aktuellen Thema erschienen, immer mit dem Ziel, das aktuelle Wissen zum Einsatz der industriellen Bildverarbeitung in allgemein verständlicher Form zur Verfügung zu stellen. Mit dem vorliegenden Band 21 zur optischen 3D-Messtechnik wird nun ein aktueller Zukunftstrend erneut aufgegriffen.

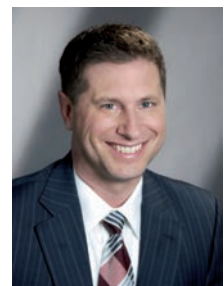
Die Leser sollen eine realistische Vorstellung hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen heute verfügbarer Technologien erhalten. Das Werk setzt sich daher aus theoretischen und praktischen Beiträgen der angewandten Wissenschaft und industriellen Forschung zusammen. Viele relevante Informationen und wesentliche Aspekte werden abgedeckt.

Die Zusammenstellung der Texte und Referenzen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder systematische Aufarbeitung des Themenkomplexes. Zur Planung eigener Projektvorhaben enthält der Leitfaden Anzeigen einschlägiger Firmen als mögliche Partner bei der Umsetzung.

Bei konkreten Fragestellungen kann das zentrale Büro des Fraunhofer Geschäftsbereichs Vision beratend zur Seite stehen oder die grundsätzliche Machbarkeit prüfen lassen. Anwenderspezifische Entwicklungen können von institutsübergreifenden Projektteams von Fraunhofer durchgeführt werden, bis hin zum voll funktionsfähigen Prototyp. Auf Wunsch werden Komplettlösungen einschließlich aller Handhabungskomponenten aus einer Hand bereit gestellt. Ein Netzwerk von Vision Partnern aus Industrie und Wissenschaft ergänzt die Möglichkeiten.

Michael Sackewitz

Fraunhofer Geschäftsbereich Vision
Koordinierungsbüro Fürth
Telefon: +49 911 58061-5800
vision@fraunhofer.de



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|------------|---|
| 1 | Einführung | 2 |
|----------|------------|---|

Verfahren und Methoden

| | | |
|-----------|--|----|
| 2 | Überblick über optische 3D-Messverfahren | 4 |
| 3 | Industriephotogrammetrie | 7 |
| 4 | Stereobildverarbeitung/Triangulation | 13 |
| 5 | Muster- und Streifenprojektionsverfahren | 17 |
| 6 | Lichtschnittverfahren | 22 |
| 7 | Deflektometrie | 26 |
| 8 | Inverse Deflektometrie | 31 |
| 9 | Lichtfeldkamera | 34 |
| 10 | Konfokalmikroskopie | 38 |
| 11 | Fokus-Variation | 41 |
| 12 | Weißlichtinterferometrie | 44 |
| 13 | Digitalholographische 3D-Messtechnik | 48 |
| 14 | LiDAR-Sensoren | 52 |
| 15 | Optische Kohärenztomographie | 58 |
| 16 | Röntgen-Computertomographie | 62 |

Auswertung und Algorithmik

| | | |
|-----------|--|----|
| 17 | Modellbasierte Analyse und Auswertung von 3D-Punktwolken | 67 |
| 18 | Intelligente Algorithmen zur Messdatenauswertung | 72 |
| 19 | Analyse von 3D-Punktwolken mit semantischen Konzepten | 75 |

Typische Anwendungsfelder

| | | |
|-----------|--|-----|
| 20 | Dimensionelle Inline-Qualitätsprüfung | 79 |
| 21 | In-Prozessprüfung von Montagebaugruppen | 83 |
| 22 | 3D-Objektlageerkennung auf Basis optischer Sensordaten | 86 |
| 23 | Schnelle 3D-Erfassung mittels Lichtschnitt | 89 |
| 24 | Mobiles 3D-Laserscanning | 92 |
| 25 | Submikrometergenaue 3D-Oberflächenmessung in der Produktion | 96 |
| 26 | Weißlichtinterferometrie in der industriellen Qualitätssicherung | 99 |
| 27 | Schnelle Inline-Geradheitsmessung von Langprodukten mit Laserscanning-Ansatz | 102 |
| 28 | Virtueller Zusammenbau in der 3D-Messtechnik | 105 |
| 29 | Assistenzsysteme | 108 |

Normen, Standards, Richtlinien

| | | |
|-----------|--|-----|
| 30 | Normen und Richtlinien | 111 |
| 31 | Faires Datenblatt: Vergleichbarkeit optischer 3D-Oberflächenmessgeräte | 124 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| Autorinnen und Autoren | 126 |
|-------------------------------|-----|

| | |
|------------------|-----|
| Impressum | 129 |
|------------------|-----|

Einführung

MICHAEL SACKEWITZ

Hintergrund

Digitale Bildverarbeitung ist eine Schlüsseltechnologie mit hoher Dynamik. Viele der Produkte, die heute aus unserem täglichen Leben aus Komfort- oder Sicherheitsgründen nicht mehr wegzudenken sind, haben diesen Status nur aufgrund der in ihnen integrierten oder bei ihrer Herstellung genutzten Bildverarbeitung erreicht. Auch wenn als »Hidden Technology« meist gar nicht erkennbar, ist Bildverarbeitung allgegenwärtig und spielt im gesamten industriellen Wertschöpfungsprozess branchenübergreifend eine tragende Rolle. Immer neue Einsatzmöglichkeiten werden erschlossen – in der Fertigungs- und Automatisierungstechnik, der Qualitätssicherung und als leistungsstarkes Werkzeug der zerstörungsfreien Prüfung.

Die Vorzüge liegen auf der Hand: Lösungen für maschinelles Sehen sind schnell und scheuen weder Lärm noch Gefahren. Zudem arbeiten sie ermüdungsfrei, sodass Ergebnisse objektiv und wiederholbar sind. Daneben sind sie im Vorteil beim Messen von absoluten Größen wie Länge oder Farbe. Auch können Sensoren, etwa indem sie erweiterte oder andere Spektralbereiche als das sichtbare Licht nutzen, in das Innere von vielen Objekten hineinschauen und somit für das menschliche Auge Verborgenes sichtbar machen.

Die Leistungsfähigkeit und der Spektralbereich, der eingesetzten Sensoren, werden dabei immer größer und die Kombination unterschiedlicher Sensortypen vielfältiger. Gleichzeitig ist die Intelligenz der Systeme zur Datengewinnung erheblich gewachsen und dezentraler geworden.

Vor allem dem enormen Leistungszuwachs der Rechnertechnik und noch mehr den Fortschritten in der Algorithmik verdanken wir heute wirtschaftliche Industrielösungen, die sehr flexibel im Einsatz und dennoch in der Bedienung einfach sind.

Die stärksten Impulse hinsichtlich Usability kommen aus dem Consumerbereich. Insbesondere die technische Entwicklung der Smartphones beflügelt die Erwartungshaltung der Nutzer an moderne Bildverarbeitungstechnologien. Dies spiegelt sich auch in gesteigerter Akzeptanz und Verbreitung bei industriellen Anwendungen wider.

Optische 3D-Messtechnik

Gerade vor diesem Hintergrund gewinnen innovative bildgebende 3D-Technologien zunehmend an Bedeutung und stehen im besonderen Fokus vieler Anwenderbranchen, wie der Automobilindustrie, Halbleiterfertigung und Robotik als den wichtigen Automatisierungstreibern.

Optische 3D-Messtechnik bietet sich vor allem an, wenn die klassischen Verfahren und Methoden beim Prüfen, Messen und Führen an Grenzen stoßen. Mithilfe berührungsloser 3D-Messtechnik lassen sich viele Aufgaben technisch einfacher, schneller, exakter und robuster lösen.

Der fertigungsintegrierte Einsatz optischer 3D-Messtechnik ermöglicht beispielsweise, Qualitätsabweichungen bereits bei ihrer Entstehung zu erkennen und so rechtzeitig auf Veränderungen im Prozessablauf zu reagieren. Für viele Anwendungen ist der klassische Messraum zu weit weg und damit zu langsam für schnelle Qualitätsregelkreise.

Ein weiterer Einsatzschwerpunkt berührungsloser 3D-Messtechnik liegt bei der schnellen automatischen 100-Prozent-Kontrolle von oft schweren und großen Bauteilen, die mechanisch meist nur stichprobenartig und sehr zeitaufwendig geprüft werden können. Auch die relative Verformbarkeit und Elastizität einiger Materialien schließt aufgrund der Rückwirkung in einigen Fällen eine zuverlässige 3D-Messung durch ein taktiles Koordinatenmessgerät aus. Diese Einschränkung trifft insbesondere auf geschäumte, weiche, brüchige oder hochporöse Bauteile und Gewebestrukturen zu.

Eine weitere Herausforderung ist die kombinierte Form- und Oberflächenprüfung von Mikrostrukturbauteilen. In der Praxis lassen sich diese Aufgabenbereiche nicht mehr auseinanderhalten, da die immer präzisere Oberflächeninspektion im Grenzbereich schließlich zu einer dreidimensionalen Messung der Oberfläche im Mikro- und Nanometerbereich führt. Hier werden überwiegend kontaktfrei arbeitende optische Verfahren verwendet, mit denen sich über große Skalenbereiche hinweg Strukturmerkmale bis in den Sub-Mikrometerbereich erfassen lassen. Über die flächenbasierte Messung mit sehr hoher Punktdichte lassen sich zunehmend auch funktionsorientierte Aussagen über die Oberfläche gewinnen.

Noch bewegt sich die optische 3D-Messtechnik stark im Bereich des sichtbaren Lichts, jedoch nutzen bereits heute viele neue Anwendungen auch das infrarote oder ultraviolette Spektrum. So können Bildverarbeitungssysteme beispielsweise unbeeinträchtigt vom Umgebungslicht zuverlässig arbeiten.

Mit volumenbildgebenden tomographischen Verfahren wie der Röntgen-Computertomographie lassen sich zudem auch im Materialinneren verborgene Strukturen beliebig komplexer Objekte aus fast allen Werkstoffen mit hoher Genauigkeit erfassen und charakterisieren. Die dreidimensionale Darstellung am Rechner ermöglicht beispielsweise einen Soll-Ist-Vergleich zur Überprüfung der Maßhaltigkeit oder Formänderung von Bauteilen. Insbesondere in der Metrologie bietet die Computertomographie heute eine echte Ergänzung zum Prüfumfang klassischer Koordinatenmesstechnik.

Wichtige Zukunftsthemen der optischen 3D-Messtechnik sind Echtzeiterkennung sowie Bewegung. Vor allem mit 3D-Bildverarbeitung geführte Roboter haben noch viel Potenzial – vom Bin Picking, also dem Vereinzeln völlig orientierungslos liegender Teile aus einer Kiste, bis hin zur Service-Robotik mit vielfältigen Einsatzfeldern auch jenseits der Fabrikgrenzen.

Intention und Inhalt des Leitfadens

Auch wenn die digitale Bildverarbeitung in den letzten Jahrzehnten eine rasante technische Entwicklung genommen hat und große Innovationssprünge aufweist, gibt es auch heute nicht die viel zitierte »eierlegende Wollmilchsau«. Vielmehr hängt der effektive Einsatz von Bildverarbeitung nach wie vor stark vom individuellen Anwendungsfall ab und ist regelmäßig, auch heute noch, Sache von Experten.

Vor diesem Hintergrund möchte der vorliegende 21. Band der Fraunhofer Vision-Leitfaden-Reihe potenziellen Anwendern das aktuelle Wissen zum Einsatz optischer 3D-Messtechnik in allgemein verständlicher Form zur Verfügung stellen. Der Leser soll eine realistische Vorstellung bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen heute verfügbarer Technologien im Hinblick auf die Bewältigung praxisrelevanter Mess- und Prüfaufgaben im industriell geprägten Umfeld erhalten.

Der Leitfaden setzt sich aus theoretischen und praktischen Beiträgen der angewandten Wissenschaft und industriellen Forschung zusammen. Der abschnittsweise Aufbau orientiert sich dabei an nachstehendem Schema.

Im Abschnitt »Verfahren und Methoden« erfolgt als erster Einstieg in die Thematik zunächst eine Einordnung der optischen 3D-Vermessung, hier entsprechend dem Sensorprinzip in triangulierende, Intensitäts- und Laufzeitverfahren. Danach werden Grundlagen, Vor- und Nachteile und mögliche Einsatzbereiche ausgewählter optischer 3D-Messverfahren beschrieben. Zudem wird dimensionelles Messen mit Computertomographie vorgestellt.

Im Abschnitt »Auswertung und Algorithmen« liegt der Fokus auf der Verarbeitung und Auswertung der mit 3D-Messtechnik gewonnenen Daten. Da oft in sehr kurzer Zeit sehr große Datenmengen hoher Komplexität erzeugt werden, stellt das enorme Anforderungen an eine taktgebundene automatische Verarbeitung. Hier sind neue Ansätze im Zusammenspiel von Hard- und Software gefordert, um diese Komplexität zu reduzieren. So können beispielsweise in Hardware umgesetzte Vorverarbeitungsmodulare für ein reduziertes Datenvolumen sorgen, was die eigentliche Auswerteeinheit entlastet.

Im dritten Abschnitt werden »Typische Anwendungsfelder« der optischen 3D-Messtechnik anhand ausgewählter Beispiele vorgestellt. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern orientiert vielmehr darauf, das ausgesprochen breite Spektrum der optischen 3D-Messtechnik in wichtigen, für die industrielle Praxis relevanten Facetten zu beleuchten.

Der Abschnitt »Normen und Richtlinien« beschreibt internationale Normen für die taktile Koordinatenmesstechnik, die die Basis für Normen und Richtlinien für optische Sensoren bilden. Danach wird auf die speziellen Normen und Richtlinien für optische Sensoren einschließlich Computertomographie eingegangen. Weiter folgt ein Ausblick auf relevante, derzeit in Bearbeitung befindliche Normen. Abschließend wird kurz auf die Initiative »Faires Datenblatt« eingegangen.

Überblick über optische 3D-Messverfahren

GUNTHER NOTNI

Optische Sensorsysteme für 3D-Messverfahren bestehen in der Regel aus einer Lichtquelle (Sender), die das Prüfobjekt mit einem Lichtsignal beaufschlagt und einer das Lichtsignal aufzeichnenden Empfangseinheit (Empfänger). Durch das Objekt wird hierbei die Amplitude, Phase, Polarisation oder Richtung des optischen Signals (Strahlung) geändert und als Messgröße genutzt.

Durch Auswertung dieser Änderung kann dann je nach Messprinzip auf die 3D-Information bzw. Oberflächenstruktur des Objekts rückgeschlossen werden. Hieraus kann eine Vielzahl unterschiedlicher Sensorgrundprinzipien abgeleitet werden.

Eine Systematik der 3D-Messverfahren findet sich nach Beyrer, J. et al. [1] im Bild 1.

Ein auch für praktische Anwendungen wesentliches Einteilungsmerkmal ist hier neben der Informationsänderung der Strahlung auch die Einteilung von optischen 3D-Messverfahren nach dem dem Sensorprinzip inhärenten Winkel γ zwischen der Sende- und Empfangseinheit (siehe Bild 2).

Hierbei spricht man bei $\gamma = 0^\circ$ von Verfahren mit koaxialer Antastung. Verfahren nach dem Triangulationsprinzip weisen Winkel von $\gamma \gg 0^\circ$ auf. Die Verfahren mit koaxialer Antastung

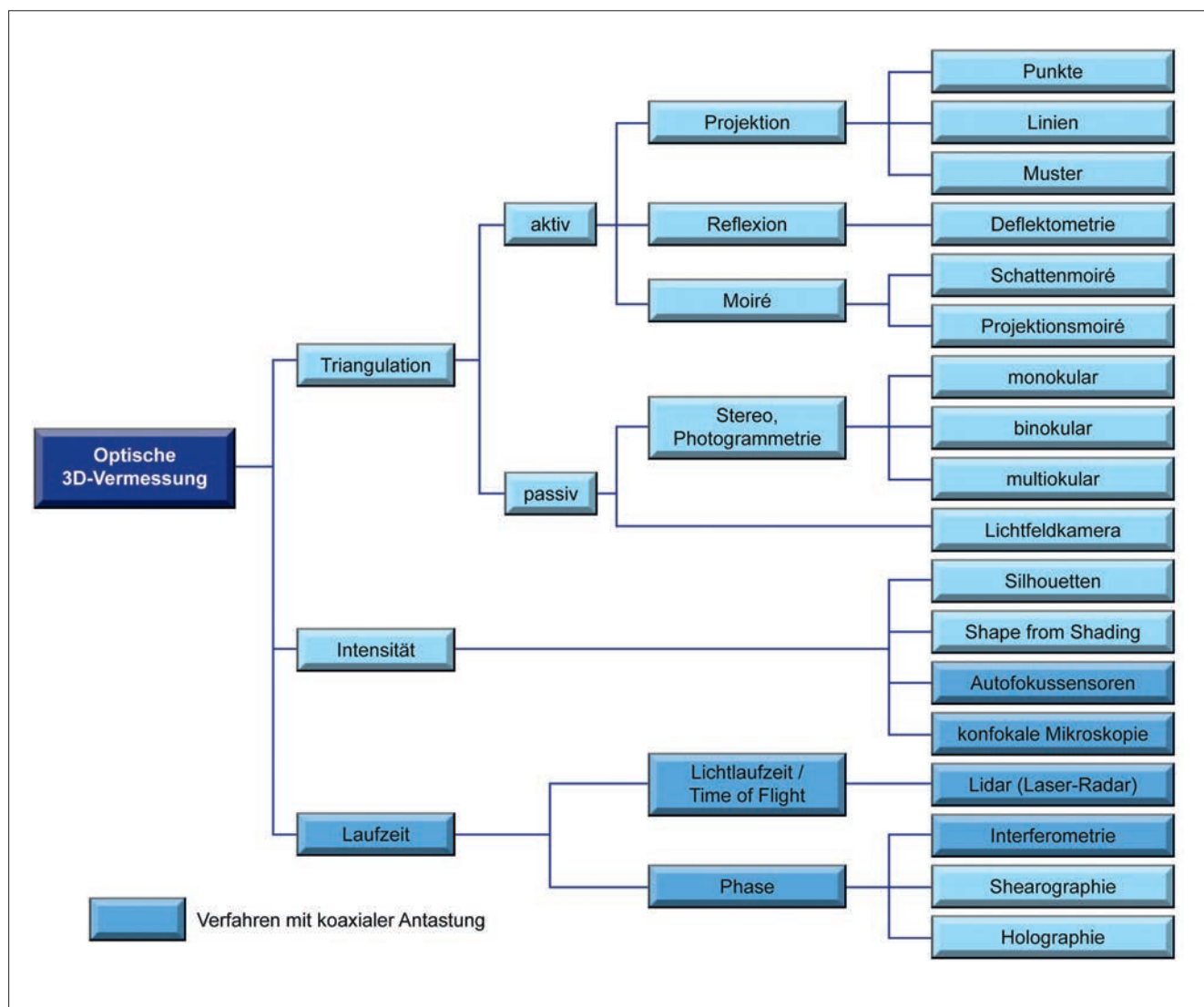


Bild 1: Einordnung optischer 3D-Messverfahren; die Einteilung folgt [1].

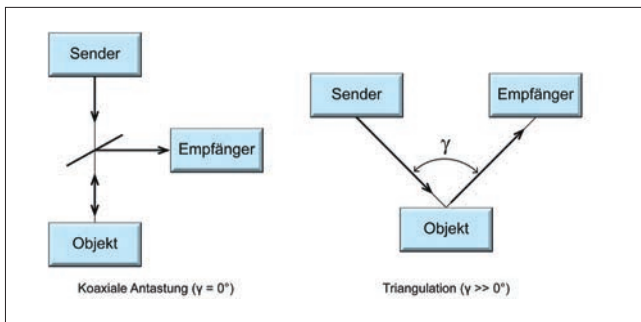


Bild 2: Grundanordnungen der optischen Antastung
(Quelle: Fraunhofer IOF).

haben hier den Vorteil, dass keine Verdeckung/Abschattung des Antastbereichs auftritt und somit z. B. eine Messung in tiefen Objektstrukturen wie Bohrungen möglich wird. Bei Verfahren nach dem Triangulationsprinzip hingegen sind Verdeckungen/Abschattungen aufgrund der unterschiedlichen Perspektiven von Sende- und Empfangsstrahlengang bei komplexen Objektstrukturen grundsätzlich nicht vermeidbar.

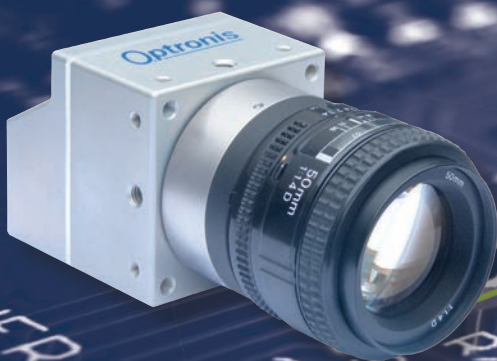
Bei der Auswahl eines Sensorprinzips ist im Rahmen der Präzisierung der Aufgabenstellung eine Vielzahl von Kriterien heranzuziehen, um eine möglichst optimale Sensorauswahl und Messdurchführung zu gewährleisten. Eine Orientierung über wesentliche zu beachtende Arbeitsschritte gibt das in Bild 3 dargestellte Ablaufschema. Insbesondere sind dies Schritte wie die Analyse des Objekts bzw. der Objektklasse, des anvisierten 3D-Messverfahrens und die Spezifizierung bzw. Auswahl der notwendigen Auswertesoftware.

In den folgenden Beiträgen werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit verschiedene der in Bild 1 aufgeführten Messverfahren in ihren Grundprinzipien näher erläutert und mit Applikationsbeispielen unterlegt.

Literatur

- [1] Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung. Berlin: Springer Vieweg, 2. Auflage 2016

3D LASERPROFIL MESSUNG



Optronis

Make time visible

CoaXPRESS Kameras
mit höchster Datenrate

CXP-12

- 4.672 x 16 Pixel bei >38.000 Profile/Sek.
- CoaXPRESS 2.0 Schnittstelle mit 50 Gbit/Sek.
- Positionierung der ROI in Echtzeit
- Line skipping und mehrfach ROI

www.optronis.com

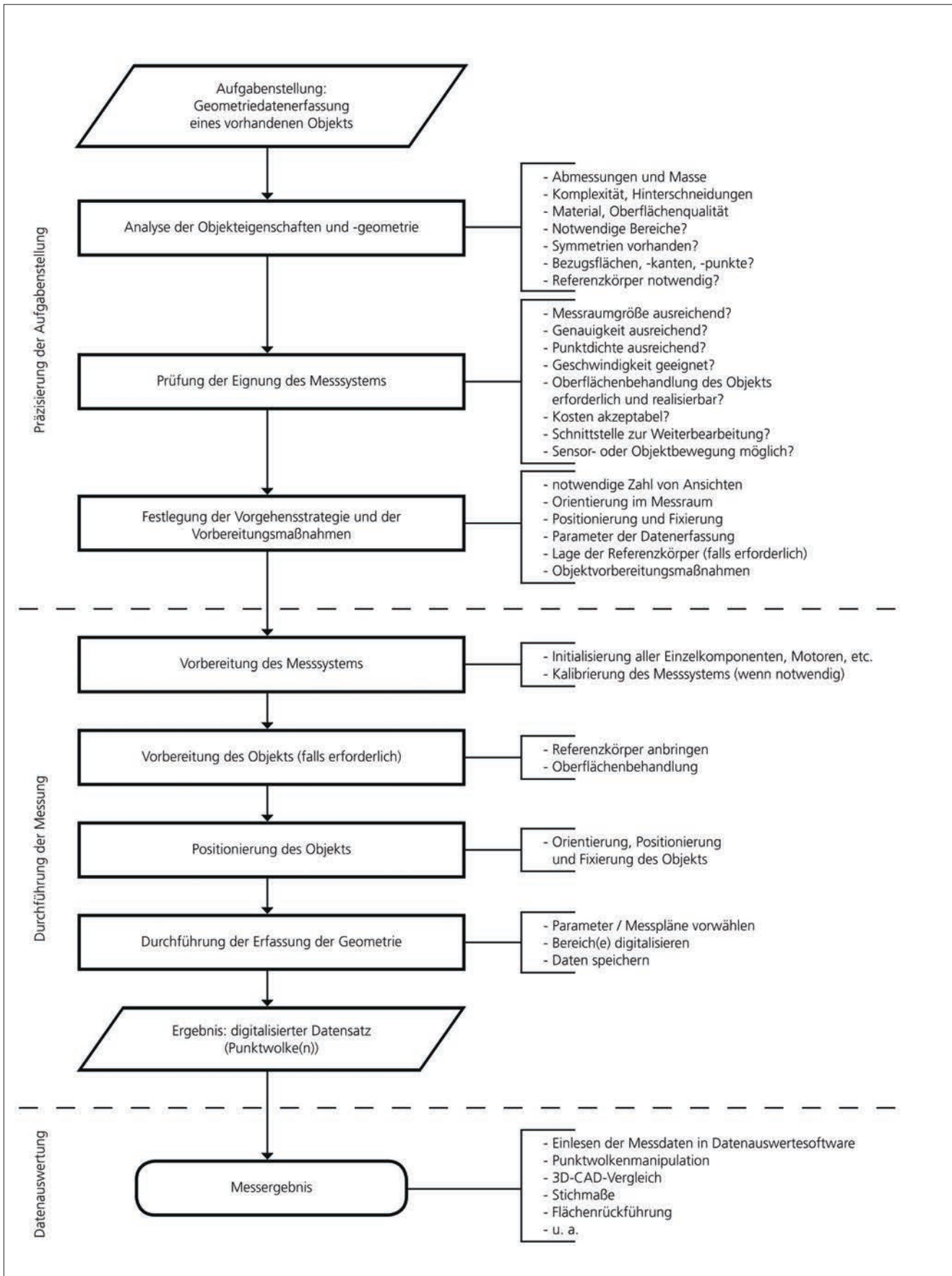


Bild 3: Ablaufschema der Planung und Durchführung einer 3D-Messaufgabe (Quelle: Fraunhofer IOF).

Industriephotogrammetrie

THOMAS LUHMANN

Einführung

Photogrammetrische Verfahren und Systeme zur dreidimensionalen industriellen Messtechnik haben in den letzten Jahren weiter an Bedeutung gewonnen. Die Gründe dafür liegen im Fortschritt der digitalen Bilderfassung und Bildverarbeitung, die zu gesteigerten Messgenauigkeiten, höherem Automatisierungsgrad, schnellem und geschlossenem Datenfluss und leichter Bedienbarkeit geführt haben. Daneben führen aktuelle Trends in der Produktion (Industrie 4.0) zu einem ständig steigenden Bedarf an schneller, genauer, flexibler, integrierbarer und berührungsloser optischer 3D-Messtechnik.

Die in der Praxis heute eingesetzten Systeme lassen sich einerseits in mobile, flexible Online- und Offline-Systeme und andererseits in stationäre und prozessintegrierte Systeme unterteilen.

In den meisten Fällen steht die Erfassung einzelner 3D-Punktkoordinaten im Vordergrund, häufig unterstützt durch diskrete Punktsignalisierungen. Vermehrt kommen aber auch Oberflächenmesssysteme zum Einsatz, die auf der Basis von projizierten Streifen- oder Flächenmustern oder natürlich vorhandener Texturen arbeiten. Die Anwendungsgebiete der Industriephotogrammetrie reichen von hochgenauen Qualitätskontrollen im Flugzeugbau über integrierte Systeme in Fertigungsanlagen bis zur Aufnahme und Dokumentation von Industrieanlagen.

Mit der Erarbeitung einheitlicher Empfehlungen für die Annahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme ist bereits im Jahr 2000 die Grundlage für objektive und nachvollziehbare Genauigkeitsangaben gelegt worden ([5] und Beitrag 30 »Normen und Richtlinien«).

Der industrielle Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie begann, von Einzelanwendungen abgesehen, in den frühen 1980er Jahren. Ein Rückblick auf die Entwicklung der Photogrammetrie findet sich in [1, 2, 4]. Hier sind auch die mathematischen und technischen Grundlagen der Photogrammetrie zu finden.

Photogrammetrische Industriemesssysteme

Systeme zur Punkterfassung: Offline-Photogrammetrie

In industriellen Anwendungen geschieht die punktweise Erfassung von 3D-Koordinaten üblicherweise mithilfe signalisierter Zielmarken oder durch taktile Antastung. Für die Signalisierung haben sich helle, kreisförmige Marken durchgesetzt, die aus retroreflektierendem Material bestehen, selbstleuchtend sind oder einfach auf Papier oder Folie gedruckt realisiert werden können. Werden diese Marken zusätzlich mit einem geeigneten maschinenlesbaren Code versehen, kann nicht nur das Punktzentrum sicher und genau bestimmt werden (besser als 1/10 Pixel), sondern auch die Punktidentifizierung (Punktnummer) automatisch zugeordnet werden. Signalisierte Punkte oder entsprechende mechanische Adapter sind so zu gestalten und zu verteilen, dass das eigentliche (möglicherweise nicht direkt messbare) Objekt durch diese Hilfsmittel hinreichend genau repräsentiert wird. Ein typisches Offline-Photogrammetriesystem besteht aus einer hochauflösenden Digitalkamera (Spiegelreflexkamera) mit integrierter Datenspeicherung. Die Datenverarbeitung geschieht in einem (tragbaren) Rechner, der über eine entsprechende Schnittstelle zum Bildspeichermedium verfügt (z. B. FireWire, USB, Bluetooth, WLAN).

Die Bildauswertung und 3D-Punktbestimmung läuft typischerweise in folgenden Schritten ab:

- **Bildpunktmessung**
Sämtliche Bilder werden automatisch nach punktförmigen Mustern durchsucht, die Kandidaten für tatsächlich signalisierte Punkte darstellen. Wenn Punktcodierungen erkannt werden, werden die gemessenen Bildpunkte mit ihrer zugehörigen Nummer abgespeichert, sonst werden sie fortlaufend nummeriert abgelegt.
- **Näherungswertberechnung**
Die über ihren Punktcode identifizierten Bildpunkte werden bildübergreifend zugeordnet. Liegen für ein beliebiges Bildpaar mindestens fünf homologe Punkte vor, kann mittels relativer Orientierung ein Modellsystem erzeugt werden, in dem alle weiteren Bildpunkte unter Zuhilfenahme der Epipolarometrie zugeordnet werden können. Weitere Bilder oder Modelle können an dieses Startbildpaar angehängt werden, bis alle Bilder näherungsweise orientiert sind. Werden anhand der Punktcodierungen bekannte

Passpunkte identifiziert, kann das lokale Modellsystem in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem transformiert werden. Auf diese Weise können sukzessive alle Bilder näherungsweise orientiert und alle gemessenen Bildpunkte näherungsweise im Raum bestimmt werden.

- **Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung**
Die folgende Bündelausgleichung liefert neben den äußeren Orientierungsdaten und den Objektkoordinaten aller gemessenen Punkte auch die Parameter der inneren Orientierung, sodass bei geeigneter Aufnahmekonfiguration der geometrische Zustand der Aufnahmekamera für den Zeitpunkt der Objektmessung simultan mitbestimmt werden kann (Kamerakalibrierung). Eine besondere Problematik liegt in der Erkennung und Eliminierung grober Fehler (Ausreißer), die durch Fehler in der Bildmessung oder Identifizierung und Zuordnung auftreten können.
- **Ergebnisabgabe**
Die gemessenen Objektpunkte können in beliebiger Weise weiterverarbeitet werden. Üblich ist die direkte Integration photogrammetrischer Auswertesysteme in 3D-CAD-Systeme oder die Anbindung an Systeme für den Soll-Ist-Vergleich.

Die in den letzten Jahren entwickelten vollautomatischen Ansätze nach dem sog. Structure-from-Motion-Prinzip (SfM) erlauben die Erfassung von dichten 3D-Punktwolken mithilfe der natürlichen oder einer künstlich aufgebrachtene Oberflächentextur. Da die Messung von nicht-signalisierten Bildmerkmalen nur mit einer Genauigkeit von ca. 0,5 bis 1 Pixel erfolgt, sind diese Methoden deutlich ungenauer als die o. g. Vorgehensweise, eignen sich aber dennoch für viele Aufgaben zur Erfassung von Freiformflächen mit reduzierten Genauigkeitsanforderungen.

Systeme zur Punkterfassung: Online-Photogrammetrie

Online-Systeme basieren auf der simultanen, synchronisierten Mehrbildefassung des Objektraums. Eine weitere Verbreitung haben taktile photogrammetrische Koordinatenmesssysteme erlangt. Hierbei wird ein Messtaster, in der Regel manuell, an die Objektoberfläche geführt. Üblicherweise besteht der Taster aus einer hochgenauen Tastspitze und mindestens drei Referenzmarken, die von den Kameras beobachtet werden können. Durch Starten der Messung am Taster werden die Kameras ausgelöst. Mittels räumlichem Vorwärtsschnitt werden die 3D-Koordinaten der Referenzpunkte am Taster und damit die in diesem lokalen System kalibrierte Position der Tastspitze bestimmt. Der Messablauf sieht typischerweise folgendermaßen aus:

- **Vorabkalibrierung**
Aufgrund der eingeschränkten Aufnahmeanordnung ist keine Simultankalibrierung der Kameras möglich. Sie müssen also vorab kalibriert werden, z. B. mithilfe eines geeigneten Testfelds. Die ermittelten Daten der inneren Orientierung werden für die Messungen als konstant vorausgesetzt, d. h. die eingesetzten Kameras müssen hinreichend mechanisch stabil sein.
- **Orientierung der Kameras**
Nach dem Aufstellen der (beiden) Kameras erfolgt die gegenseitige Orientierung über einem signalisierten Punktfeld. Damit wird ein lokales Gerätekoordinatensystem erzeugt. Bei fest in einem Gehäuse installierten Kameras ist die Orientierung bereits werkseitig bestimmt.
- **Taktile Messung**
Es folgt die (manuelle) taktile Objektmessung analog zu taktilen Koordinatenmessgeräten.
- **Nachorientierung**
Einige Systemhersteller erlauben die ständige Nachorientierung der Kameras an dem festen Punktfeld, um etwaige Veränderungen der Kamerapositionen und Aufnahmerichtungen zu ermitteln.
- **Ergebnisabgabe**
Ein taktiles Online-Photogrammetriesystem kann als optische Koordinatenmessmaschine aufgefasst werden, deren Ergebnisse sofort nach der Antastung vorliegen und weiterverarbeitet werden können.

Der hier beschriebene Messablauf vereinfacht sich noch erheblich, wenn die Kameras fest in einem gemeinsamen Gehäuse angeordnet und dauerhaft orientiert sind, wie man es im Prinzip von älteren Stereomesskameras kennt. Solche Systeme werden vielfach in der Medizintechnik, aber zunehmend auch in der industriellen Messtechnik eingesetzt.

Neben dem oben erwähnten Online-Messprinzip existiert eine Variante, bei der eine einzelne Messkamera im handgeführten Taster selbst untergebracht ist (Bild 1). Mithilfe eines in der



Bild 1: Online-Messsystem ProCam von Hexagon
(Quelle: Daimler AG).



Bild 2: Photogrammetrische Einmessung von Passpunkten (oben) und anschließende Aufnahme mit dem Streifenprojektionssystem GOM ATOS (unten) (Quelle: GOM).

Nähe platzierten Referenzpunktfelds, das über kalibrierte und codierte Zielmarken verfügt, kann die Kameraorientierung per räumlichem Rückwärtsschnitt automatisch ermittelt und die dazu kalibrierte Tastspitze im Raum bestimmt werden.

Systeme zur Oberflächenerfassung

Für die Erfassung beliebig geformter, industrieller Oberflächen ist häufig keine Signalisierung mit diskreten Punkten möglich oder sinnvoll. Für die Messung von Freiformoberflächen haben sich vor allem Streifenprojektionssysteme durchgesetzt, die eine sekundenschnelle 3D-Erfassung erlauben. Dabei werden streifenförmige periodische Muster auf die Objektoberfläche projiziert, die sequentiell verschoben werden und durch eine oder mehrere räumlich versetzte Kameras beobachtet werden. Die Höhenänderung am Objekt wird dabei entweder



Bild 3: Oberflächenmesssystem Creaform HandyScan (rechts) (Quelle: Creaform).

durch Messung der Phasenverschiebung des wellenförmigen Streifenmusters oder durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt gemessen, wenn mehr als eine Kamera eingesetzt wird [2, 6].

Größere oder komplexer geformte Oberflächen können mit der Streifenprojektionstechnik nur in mehreren Teilansichten erfasst werden. Dazu wird das Aufnahmesystem mittels signalisierter Punkte photogrammetrisch im Raum orientiert, sodass die erfassten 3D-Punktwolken absolut aufeinander transformiert werden können. Auf diese Weise können beispielsweise ganze Automobilkarosserien gemessen werden (Bild 2) [6, 7].

Handgehaltene oder robotergeführte Messköpfe, die optisch im 3D-Raum navigiert bzw. orientiert werden, arbeiten z. B. mit projizierten Lasermustern (Punkte, Linien, Muster) und einer oder mehreren Kameras. Die Orientierung des Messkopfs erfolgt entweder über simultan erfasste Pass- oder Verknüpfungspunkte am Objekt (Bild 3) oder durch ein zweites 3D-Messsystem, das wiederum mindestens drei Punkte am Messkopf bestimmt. Zunehmende Bedeutung erlangen produktionsintegrierte, robotergeführte Systeme, die in einer speziellen Messzelle aufgebaut werden (Beispiel in Bild 4).

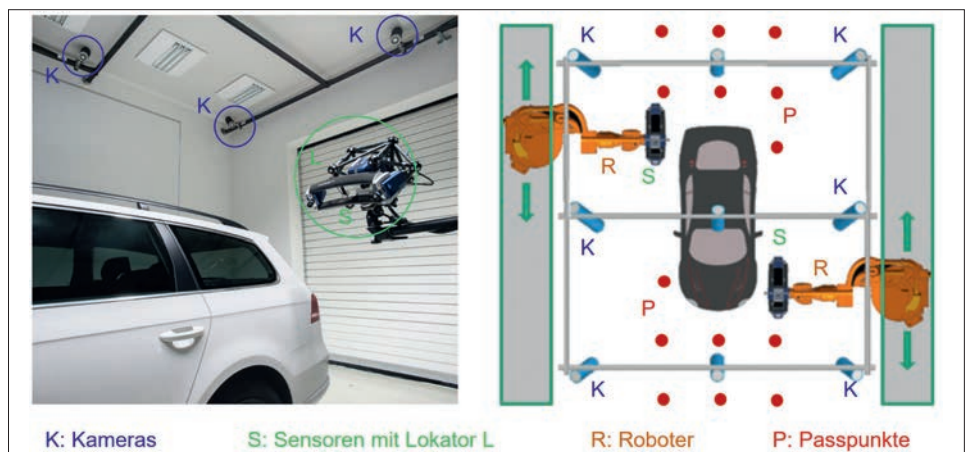
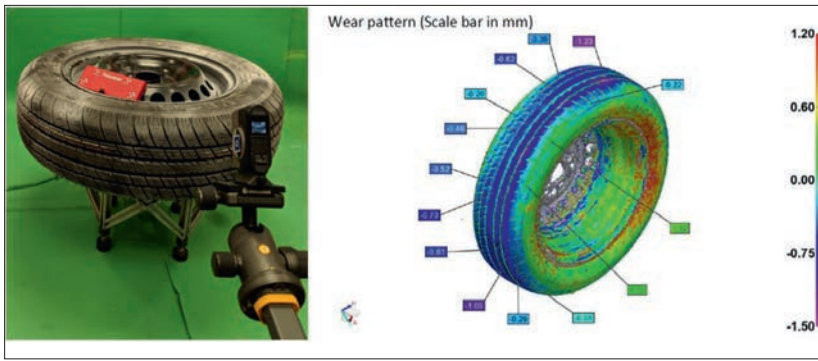


Bild 4: Oberflächensensor an einem Roboter in einer Messzelle (Quelle: Hexagon, bearbeitet).



Genauigkeitskriterien

Die erreichbare Genauigkeit ist ein wesentliches Kriterium für die Nutzbarkeit und Akzeptanz eines photogrammetrischen oder optischen 3D-Messsystems in der industriellen Praxis. Im Gegensatz zu anderen Kenngrößen eines Systems, wie technische Ausführung, Messzeiten, Bedienerfreundlichkeit, Flexibilität usw. liegt mit der Messgenauigkeit bzw. Messunsicherheit eine einzige quantitative Größe vor, die zur Beurteilung des Messsystems herangezogen werden kann.

Die rein photogrammetrische Oberflächenerfassung erfolgt entweder klassisch stereoskopisch oder durch Mehrbildzuordnung. In beiden Fällen muss die Objektoberfläche ausreichend strukturiert sein, entweder durch die natürlich vorhandene Oberflächentextur oder durch Projektion eines künstlichen Musters. Die Zuordnung homologer Bildbereiche geschieht bei automatischen Messverfahren durch Verfahren der Bildkorrelation (Digital Image Correlation DIC), Merkmalszuordnung oder Kleinste-Quadrate-Zuordnung, ebenfalls wieder unter Berücksichtigung der Epipolargeometrie. Inzwischen existieren auch Sfm-basierte Systeme, bei denen die Bildauswertung und 3D-Analyse über eine Cloud geschehen, sodass vor Ort weder spezifische Fachkenntnisse noch spezialisierte Software zur Verfügung stehen müssen (Beispiel in Bild 5). Digitale Stereoauswertesysteme, die in der Regel für die Luftbildphotogrammetrie konzipiert worden sind, können mit wenigen Einschränkungen auch für die Oberflächenerfassung im Nahbereich eingesetzt werden. Verbreitete industrielle Anwendungen bestehen im Bereich der Verformungsanalyse, z. B. zur Strain-Analyse bei der Blechbearbeitung oder der Deformationsmessung an Rotorblättern. Ein Beispielsystem ist in Bild 6 zu sehen.

Die traditionelle photogrammetrische oder geodätische Betrachtungsweise der erreichten Messgenauigkeit basiert auf inneren numerischen oder statistischen Kenngrößen, wie der Standardabweichung der Gewichtseinheit oder der Standardabweichung der einzelnen berechneten Punktkoordinaten. Sie spiegeln jedoch lediglich die numerische Genauigkeit wider, mit der das eingegebene mathematische Modell die tatsächlich beobachteten Messwerte auf die gesuchten Unbekannten abbildet und basieren auf der Annahme, dass keine unbekannt systematischen Fehler in den Beobachtungen vorliegen. Diese Vorgehensweise prüft zwar durchgreifend die innere Genauigkeit und Zuverlässigkeit, nicht aber die tatsächlich im Objektraum erreichte Messunsicherheit im Bezug zu übergeordnet genau gegebenen Referenzen.

Für eine grobe a priori Abschätzung der erreichbaren Punktgenauigkeit wird in der Regel folgende Beziehung eingesetzt:

$$S_{xyz} = q \cdot m_b \cdot s_{xy}$$

Dabei wird die Unsicherheit der Bildpunktmessung s_{xy} mit dem Abbildungsmaßstab m_b in den Objektraum S_{xyz} übertragen. Der Designfaktor q beschreibt den Einfluss der Aufnahmeconfiguration, also die Anordnung der einzelnen Bilder, die zur Punktbestimmung beitragen, sowie weiterer nicht exakt formulierbarer Einflüsse. Für gut konfigurierte Mehrbildverbände (mindestens 4 bis 6 konvergente Bilder pro Punkt) lässt sich ein Designfaktor zwischen 0,4 und 0,8 erreichen, gültig für alle drei Koordinatenrichtungen. Für Objektpunkte, die mit weniger oder ungünstiger angeordneten Bildern erfasst werden, oder für klassische Stereoanordnungen kann der Designfaktor leicht Werte größer 2 annehmen, z. B. in Aufnahme-richtung ausgedrückt durch das Höhen-Basis-Verhältnis.

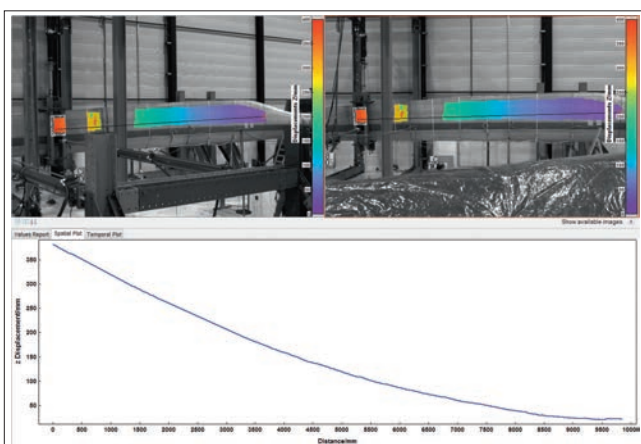


Bild 6: Photogrammetrische Oberflächenerfassung zur Strain-Analyse bei der Deformationsmessung an Rotorblättern (Quelle: LIMESS).

Zur Verifizierung der tatsächlich erreichten Messunsicherheit im Objektraum sind mit übergeordneter Genauigkeit kalibrierte Referenzen erforderlich. Grundsätzlich könnte dies durch

geeignet gemessene Passpunkte geschehen, die als unabhängige Vergleichspunkte herangezogen werden. Häufig ist es jedoch nicht möglich, zuverlässige und mit übergeordneter Genauigkeit vorliegende Passpunkte bereitzustellen.

Geeigneter sind kalibrierte Maßstäbe (Längennormale), die als Prüflängen für die Ermittlung einer Längenmessabweichung verwendet werden (Beispiele in Bild 7). In der im Jahr 2000 eingeführten Richtlinie VDI/DE 2634 »Optische 3D-Messsysteme« werden Empfehlungen gegeben, wie geeignete Kenngrößen für punktförmig und flächenhaft antastende Systeme ermittelt werden können und die Rückführbarkeit auf die Einheit Meter gewährleistet werden kann ([3, 5] und Beitrag 30 »Normen und Richtlinien«).

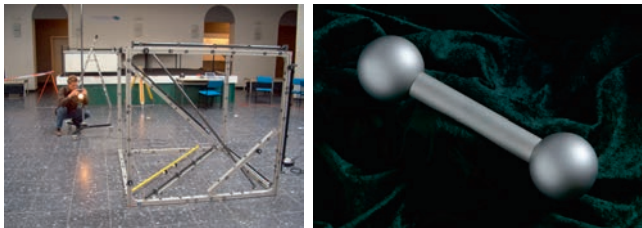


Bild 7: Beispiele für photogrammetrische Referenzkörper. Testfeld mit Messlinien nach VDI 2634 (links) und Kugelhantel (rechts) (Quelle: Jade Hochschule Oldenburg).

Aus den Differenzen gemessener Längen zu ihren kalibrierten und zertifizierten Sollwerten kann ein Längenabweichungsdiagramm (Bild 8 unten) abgeleitet werden, das die oberen und unteren Grenzwerte darstellt, zwischen denen sämtliche Längenmessabweichungen liegen.

Die Anordnung der Prüflängen erfolgt dabei nach dem in Bild 8 oben vorgeschlagenen Schema, das innerhalb eines praktikablen Messvolumens eine Anzahl von Prüfstrecken enthält, um in allen Koordinatenrichtungen repräsentative Genauigkeitsaussagen zu erhalten. Die daraus ableitbare Längenmessunsicherheit ist konform zu internationalen Normen und bietet Vergleichbarkeit mit entsprechenden Richtlinien aus der taktilen Koordinatenmesstechnik. Für Oberflächenmesssysteme wird statt der Längenmessunsicherheit eine Kugelabstandsabweichung bestimmt, zusätzlich auch eine Ebenheitsmessabweichung und eine Antastunsicherheit.

Photogrammetrische Offline-Systeme mit hochauflösenden Digitalkameras erreichen eine Längenmessunsicherheit von 20 µm in einem Messvolumen von ca. 2 × 2 × 2 m³ bei Verwendung signalisierter Punkte. Erreichbare Messunsicherheit und Kamerakalibrierung stehen dabei in engem Zusammenhang [3].

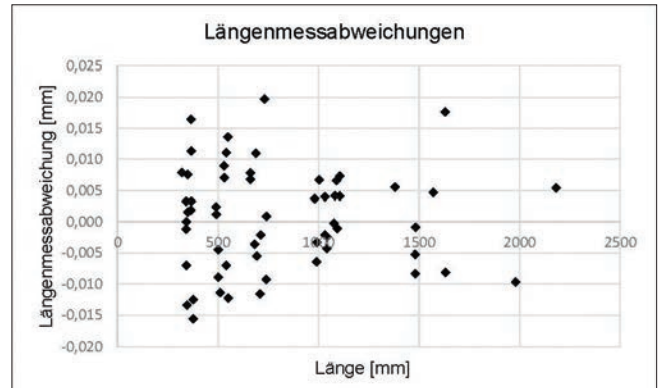
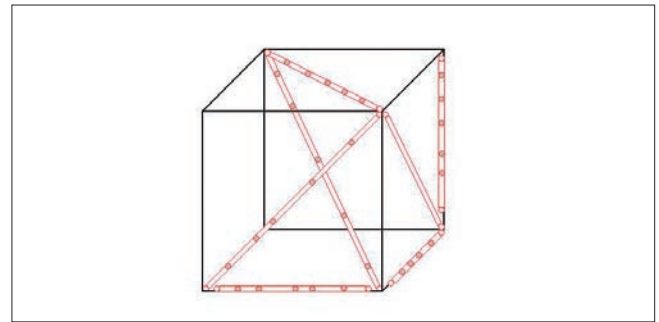


Bild 8: Anordnung der Messlinien im Messvolumen (oben) und Diagramm der Längenmessabweichung (unten) (Quelle: Jade Hochschule Oldenburg).

Zusammenfassung

Die industrielle Nahbereichsphotogrammetrie hat in den letzten Jahren einen erheblichen Aufschwung erlebt. Ursachen sind die heute verfügbaren, digitalen Aufnahmesensoren, leistungsfähige Algorithmen zur Bildmessung und Objektrekonstruktion sowie schnelle Rechnertechnik, die zu einem höheren Automationsgrad und damit leichter Bedienbarkeit photogrammetrischer Systeme geführt haben.

Der Einsatzschwerpunkt dieser Systeme liegt vor allem in der punktwisen Objekterfassung, entweder im Offline-Modus mit sequentieller Bildaufnahme und anschließender Objektauswertung, oder im Online-Modus mit simultaner Bilderfassung und optischer oder taktiler Objektantastung. Zunehmende Bedeutung erlangen photogrammetrische und optische Oberflächenmesssysteme vor allem auf der Basis von Streifenprojektionsmethoden und digitaler Bildkorrelation.

Mit der Erarbeitung einheitlicher Empfehlungen für die Abnahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme ist eine weitere Grundlage dafür gelegt, dass diese Technologie in der Praxis objektiv bewertet werden kann und damit langfristig zu einer höheren Akzeptanz in der industriellen Messtechnik führt.