

Ein Portal zur interaktiven geometrischen Inspektion großer mechanischer Bauteile

A Portal for Interactive Geometry Inspection of Large Mechanical Parts

Steffen Sauer¹, Michael Heizmann² und Dirk Berndt¹

- ¹ Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,
Magdeburg
{steffen.sauer, dirk.berndt}@iff.fraunhofer.de
² Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
michael.heizmann@kit.edu

Zusammenfassung This paper presents a novel approach for interactive inspection of large mechanical parts. Therefore we use a linear moveable portal, which is equipped with a multi sensor head that consists of a fringe projection sensor and an Augmented Reality camera system. The portal covers a measuring volume of $8.0 \times 3.0 \times 0.8 \text{ m}^3$ and uses an optical Motion Capturing System to track the sensors position and orientation in a global reference frame. Inspection preparation and execution is assisted by sensor data simulation. We show that using Augmented Reality a user can easily detect rough geometry deviations. For detailed quality inspection a user can acquire 3D point clouds which are evaluated automatically.

Keywords Quality inspection, tracking, 3D measurement, augmented reality, simulation

1 Problemstellung und Motivation

Bei der CNC-Fertigung von Werkstücken werden mit Hilfe von Bearbeitungsmaschinen Rohteile zerspanend bearbeitet. Als Rohteile kommen einfache Halbzeuge aber auch komplexere Guss- und Schmiedeteile sowie Schweißkonstruktionen zum Einsatz. Dabei ist

DOI: 10.58895/ksp/1000124383-10 erschienen in:

Forum Bildverarbeitung 2020

DOI: 10.5445/KSP/1000124383 | <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.58895/ksp/1000124383/>

es von enormer Wichtigkeit, dass die zu bearbeitenden Werkstücke der vorgegebenen Rohteilgeometrie entsprechen und eine zulässige Maßtoleranz nicht überschreiten. Bei geometrischen Abweichungen außerhalb der Toleranzen kann es ansonsten zu ungewollten Kollisionen zwischen Bearbeitungswerkzeug und dem Rohteil kommen, die im schlimmsten Fall zu einem Totalausfall der Maschine führen können. Die zulässigen Toleranzen sind anwendungsabhängig, liegen bei Rohteilen, die mit Portal-CNC-Maschinen bearbeitet werden, jedoch im unteren einstelligen Millimeterbereich. Um derartige Schäden zu vermeiden, stellt die geometrische Inspektion der Rohteile daher probates Mittel dar.

Neben taktilen Vermessungen wird in [1] beschrieben, dass eine berührungslose 3D-Vermessung der Rohteile in der Maschine bei der Ausrichtung und Erkennung von Formabweichungen hilfreich sein kann. Hierbei bleibt zu beachten, dass sowohl für die Inspektion als auch für die Behebung von Fehlern wertvolle Bearbeitungszeit verloren geht, wenn das Rohteil bereits in der Maschine liegt. Dies führt im Allgemeinen zu wenig Akzeptanz beim Anwender. Für große Bauteile und Baugruppen existieren Lösungen, die vollautomatisiert einen Soll-Ist-Abgleich [2]. Diese fahren meist feste Prüfprogramme ab und sind wenig flexibel bei Bauteilen mit sehr geringen Losgrößen und starken unvorhergesehenen Geometrieabweichungen. Handgeführte 3D-Sensoren sind hingegen für Bauteile mit geringen Losgrößen besser geeignet. In [3] wurde das Genauigkeitspotenzial derartiger Scanner untersucht und gezeigt, dass sie Absolutgenauigkeiten bieten, die für diese Aufgabe ausreichend sind. Allerdings referenzieren sich diese Sensoren durch zusätzlich aufzubringende Merkmale am Objekt und erfassen nur scannend, was ihr Einsatzgebiet einschränkt.

2 Lösungsvorschlag

Zur Inspektion großer Rohteile wurde daher ein Inspektionssystem entwickelt, welches die zuvor beschriebenen Probleme versucht zu beheben. Ziel der Entwicklung war es, das System so zu gestalten, dass es außerhalb der Bearbeitungsmaschine für große Rohteile eingesetzt werden kann, durch interaktive Bedienung für kleine

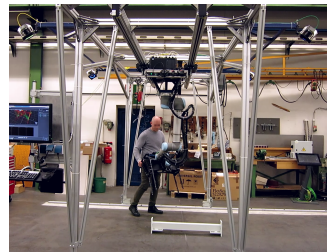
Losgrößen geeignet ist und Toleranzabweichungen im Bereich von $\pm 2,0$ mm erkannt werden können. Die Soll-Geometrie wird dabei durch das CAD-Modell der Rohteile bestimmt. Der Aufwand für die technische Realisierung soll deutlich unter dem für Koordinatenmessmaschinen liegen.

2.1 Portalaufbau

Zur partiellen dreidimensionalen Erfassung der Rohteile wurde ein flächig messender Sensor *SurfaceCONTROL* eingesetzt, der auf dem Phasenshift-Verfahren beruht [4] und in einem Arbeitsabstand von 800 mm eine ca. A3 große Fläche erfasst. Über eine Mehrachs-Kinematik, die auf Knopfdruck arretiert werden kann, ist der Sensor kopfüber mit einem Portal verbunden. Unterhalb dieses Portals kann der Sensor in einem Volumen von $2,0 \times 3,0 \times 0,8$ m³ manuell frei bewegt werden. Das Portal selbst ist auf Schienen gelagert und kann auf diesen ebenfalls manuell verschoben werden (s. Abb. 2.1). Damit vergrößert sich das gesamte Messvolumen auf $8,0 \times 3,0 \times 0,8$ m³.



(a)



(b)

Abbildung 2.1: Prototyp des Inspektionsportals: (a) CAD-Modell und (b) Bediener bei der Inspektion eines Bauteils am umgesetzten Aufbau.

Der Sensor wurde um eine weitere CCD-Kamera ergänzt, die fest in das vorhandene Gehäuse integriert wurde. Sie ist in Sichtrichtung des Sensors ausgerichtet, und besitzt einen horizontalen Öffnungswinkel von 35° . Auf der Rückseite des Sensors wurde ein 12"- Touchscreen montiert, über den die gesamte Interaktion mit dem System läuft.

Das Kamerabild wird live auf dem Display ausgegeben und es wird kontinuierlich und lagekorrekt das CAD-Modell des zu prüfenden Rohteils als Soll-Geometrie eingeblendet. Es entsteht somit eine Augmented-Reality- (AR)-Anwendung mit der ein Bediener bereits grobe Abweichungen intuitiv erkennen kann. Mit Hilfe des 3D-Sensors können dann selektiv Messdaten von dem zu prüfenden Rohteil aufgenommen werden. Diese werden dann in das Koordinatensystem des Rohteil-CAD-Modells transformiert und die Abweichung als Falschfarbendarstellung visualisiert.

2.2 Transformation von Messdaten

Um Messdaten, die in einem Sensorkoordinatensystem entstehen, mit einem CAD-Modell in Verbindung zu bringen, ist es erforderlich sie mittels einer Transformation $T_{SC} : Sensor \rightarrow CAD$ in das CAD-Koordinatensystem zu transformieren. Die Bestimmung dieser Transformation erfolgt in der hier vorgestellten Lösung über ein externes Tracking-System.

In [5] und [6] wurden kamerabasierte Motion Capturing Systeme, die ursprünglich für die Erfassung von menschlichen Bewegungen entwickelt wurden, hinsichtlich ihrer 3D-Punkt-Genauigkeiten analysiert. Abhängig von Aufbau und Messvolumen konnten Absolutgenauigkeiten von $<0,1$ mm nachgewiesen werden. Diese Tracking-Systeme zählen typischerweise zu den Outside-In-Tracking-Systemen, d.h. ein von außen beobachtendes System schätzt Lage und ggf. Orientierung eines beobachteten Körpers. Sie arbeiten Marker-basiert, wobei retroreflektierende passive Kugeln oder zur Steigerung der Robustheit aktiv leuchtende LEDs zum Einsatz kommen. Die Marker werden in Kamerabildern gefunden und es wird durch Vorwärtsschnitt aus mehreren Kameraperspektiven die zugehörige 3D-Koordinate berechnet. Zur Berechnung einer 6D-Transformation können mehrere Marker, die an einem Körper, genant *Body*, befestigt sind, zu einander eingemessen werden. Das Tracking-System versucht dann, in alle gefundenen 3D-Koordinaten bekannte *Bodies* durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate einzupassen. Das Ergebnis ist dann eine 6D-Transformation von *Body*- zu Tracking-Koordinatensystem. In der hier vorgestellten Lösung wurde ein Tracking-System der Firma OptiTrack mit vier Kame-

ras verwendet, die im oberen Bereich des Portals angeordnet und fest mit diesem verbunden sind. Sie decken den Bewegungsraum des Sensors vollständig ab. Zum Tracken des Sensors wurde dieser zusätzlich mit aktiven Marken in Form von Infrarot-LEDs versehen, die an einem Exoskelett um den Sensor herum angebracht sind (s. Abb. 2.2). Die Tracking-Software bietet eine externe Schnittstelle und liefert mit bis zu 180 Hz die Transformation $T_{BO} : Body \rightarrow OptiTrack$.



Abbildung 2.2: Modifizierter Streifenlichtsensor: (a) CAD-Modell mit zusätzlicher Augmented-Reality-Kamera, Tracking-Skelett, Griffen und Touchscreen. (b) die Umsetzung am Inspektionsportal.

Die Messdatenerzeugung erfolgt sowohl durch einen ein 3D-Sensor als auch durch eine 2D-Kamera. Zur Vereinfachung wird im Folgenden der allgemeine Begriff *Sensor* verwendet, der sich je nach Kontext auf eines der beiden Geräte bezieht. Die Orientierung des Sensors zum *Body* kann durch eine Hand-Auge-Kalibrierung bestimmt werden. Bei unserer Lösung wurde die numerische Auswertung mit den in [7] vorgestellten Verfahren durchgeführt. Das Ergebnis ist die Transformation $T_{SB} : Sensor \rightarrow Body$, die das Sensorkoordinatensystem in das *Body*-Koordinatensystem überführt.

Mit den beschriebenen Transformationen kann somit die Lage des Sensors unterhalb des Portals berechnet werden. Um die Verschiebung des Portals zu berücksichtigen wurde das Tracking-System erweitert, indem in einem eindeutig codierten Abstandsmuster weitere Infrarot-LEDs in den Fußboden eingelassen wurden. Diese LEDs werden ebenfalls vom Tracking-System erfasst und die Ebene des Fußbodens wird damit ebenfalls zu einem *Body*. Bei einer Verschie-

bung des Portals auf den horizontalen Schienen kommt es zu einer Relativbewegung, die das Trackingsystem als zusätzliche *Body*-Bewegung interpretiert. Die inverse Anwendung dieser Transformation ergibt somit die absolute Lage des Portals bezüglich der Schienen. Da in diesem Fall das Tracking-System seine Umwelt beobachtet, handelt es sich bei diesem Verfahren um ein *Inside-Out*-Tracking-System, da das System seine eigene Lage an externen Referenzmerkmalen bestimmt. Die Marken im Fußboden wurden mit einem Laser-Tracker eingemessen und liegen im als Welt definierten Koordinatensystem. Das Tracken des Fußbodens ergibt die Transformation $T_{WO} : Welt \rightarrow OptiTrack$.

Zu inspizierende Rohteile können frei innerhalb des Messvolumens abgelegt werden. Die Transformation des Bauteils zum Weltkoordinatensystem kann ermittelt werden, indem das Rohteil an vorgegebenen Flächen mit dem 3D-Sensor erfasst wird und die resultierenden 3D-Punkte durch Abstandsminimierung in das CAD-Modell eingepasst werden. Diese Punktwolken-zu-CAD-Registrierung ergibt die Transformation $T_{CW} : CAD \rightarrow Welt$.

Die gesamte Transformationskette des Systems ist in Abb. 2.3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die 6D-Sensor-Transformation zum CAD-Modell T_{SC} durch Hintereinanderausführung der beschriebenen Transformationen berechnet werden kann:

$$T_{SC} = T_{CW} \times T_{WO}^{-1} \times T_{BO} \times T_{SB} \quad (2.1)$$

2.3 Messdatenvisualisierung

Bei der Ausführung der Inspektion kann der Benutzer den Sensor frei im Messvolumen bewegen. Dabei kann wahlweise die AR-Darstellung zur subjektiven Bewertung angewählt werden oder es können 3D-Messdaten aufgenommen und ausgewertet werden. Während der Bewegung wird der Sensor kontinuierlich vom Tracking-System erfasst und durch die zuvor beschriebene Koordinatentransformation wird die Lage der AR-Kamera im CAD-Koordinatensystem berechnet. Durch Anwenden der intrinsischen Kameraparameter auf eine virtuelle Kamera und Übertragen ihrer Lage und Orientierung, können synthetische Bilder des zu inspi-

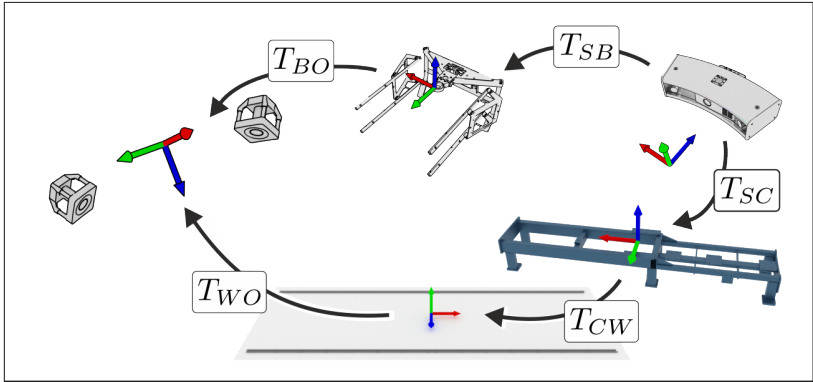


Abbildung 2.3: Koordinatentransformationen innerhalb des Inspektionsportals, um die gesuchte Transformation T_{SC} zu berechnen.

zierenden Bauteils generiert werden, die den Soll-Zustand darstellen. Durch Überlagerung des Sollzustands auf das reale Kamerabild entsteht dann eine AR-Darstellung, die eine qualitative Bewertung durch den Anwender ermöglicht (s. Abb. 10.4(a)).

Mit dem 3D-Sensor aufgenommene Messpunkte im Sensorkoordinatensystem x_S können unter Anwendung von Gl. 2.1 in das CAD-Koordinatensystem transformiert werden:

$$x_C = T_{SC} \times x_S \quad (2.2)$$

Eine gängige Methode in der geometrischen Qualitätsprüfung besteht dann darin, die Abstände der gemessenen Punkte zur Oberfläche der Soll-Geometrie zu bestimmen und in einer Falschfarbendarstellung zu visualisieren. Durch optionales Einblenden der farbcodierten 3D-Messdaten in das Kamerabild erhält der Anwender bereits einen Überblick über die schon erfassten Bauteiloberflächen und deren Abweichung (s. Abb. 10.4(b)).

Der 3D-Sensor benötigt nach Auslösen der Messung ca. 2 s, um die erforderlichen Muster zu projizieren und die Messpunkte zu rekonstruieren. Für den Anwender ist die Ausrichtung des Sensors unter Umständen nicht trivial, da er frei im Raum positionieren werden kann. So kommt es schnell zu leeren Messdaten, wenn das Objekt

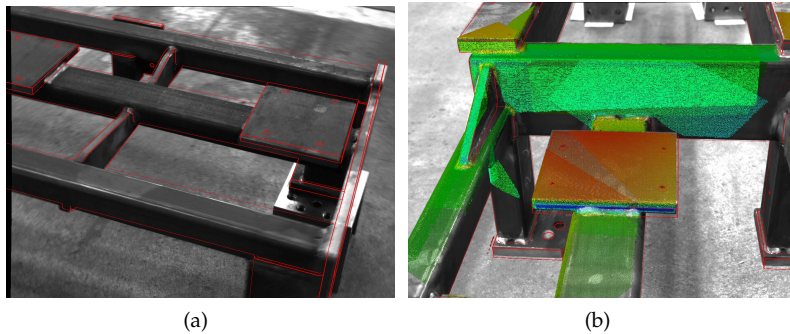


Abbildung 2.4: Ergebnisvisualisierung für den Anwender: (a) Live-Augmented Reality. Man beachte die horizontale Abweichung, die das Bauteil besitzt, (b) zusätzliche Einblendung der metrischen Abweichung durch Falschfarbencodierung.

nicht im Messvolumen des Sensors liegt. In [8] wurde bereits ein Verfahren vorgestellt, mit dem 3D-Messdaten von optischen Sensoren simuliert werden können. Diese Simulation wurde ebenfalls in die Benutzerschnittstelle integriert und kann optional aktiviert werden (s. Abb. 10.5(a)). Sie visualisiert live, welche Messdaten bei der aktuellen Sensorausrichtung im Optimalfall entstehen würden. Dies trägt zur Entlastung des Anwenders bei, da so fehlerhafte Ausrichtungen weitestgehend vermieden werden.

Zur abschließenden Bewertung können alle aufgenommenen Messdaten in Falschfarbencodierung im Kontext des CAD-Modells frei betrachtet werden (s. Abb. 10.5(b)).

3 Ergebnisse

Die Ergebnisevaluation fokussiert sich auf die Messgenauigkeit des Gesamtportals. Eine quantitative Bewertung erfolgt anhand der 3D-Messdaten, da diese metrisch gemessen werden. Die Untersuchungen sind angelehnt an die VDI/VDE-Norm 2617 [9], mit der sich die Güte 3-dimensionalen Messgeräte mit zusätzlichen Achsen objektiv bewerten lässt.

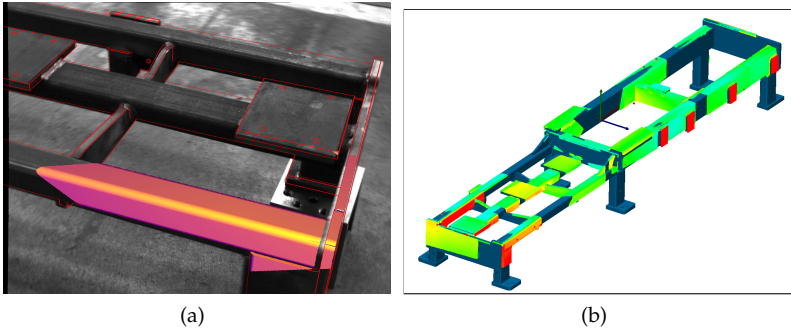


Abbildung 2.5: Unterstützung bei Aufnahme und Auswertung (a) Kontinuierliche Darstellung der Messdatensimulation im Kamerabild, (b) Gesamtdarstellung aller Abweichungen von erfassten Oberflächen im Kontext des CAD-Modells.

Im ersten Versuch wurden die *Antastabweichung* des Systems bestimmt. Dazu wurde eine Kalibrierkugel mit einem Radius von 50 mm an 19 Positionen im gesamten Messvolumen verteilt und jeweils aus 3 unterschiedlichen Richtungen mit dem 3D-Sensor erfasst. Pro Kugelposition entstanden zwischen 55.000 und 97.000 Einzelmesspunkte. In die Messdaten wurde durch Abstandsminimierung jeweils eine Ausgleichskugel mit freiem Radius eingepasst, wobei maximal 3% der Messpunkte verworfen wurden. Die Antastabweichung PF ist dann die Differenz zwischen maximalen und minimalem Messpunktabstand zum jeweiligen Kugelzentrum. Für das Portal wurde nach dieser Methode ein maximaler Wert von $PF = 2,88$ mm ermittelt. Das Histogramm über alle gemessenen Abweichungen ist in Abb. 10.1(a) dargestellt. Für die Antastabweichung wurde ein Erwartungswert von $\mu_{PF} = 1,62 \times 10^{-8}$ mm bei einer Standardabweichung von $\sigma_{PF} = 0,39$ mm ermittelt.

Zusätzlich wurde die Durchmesserabweichung PS bestimmt. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen dem tatsächlichen Durchmesser der Kalibrierkugel D_r und dem berechneten Durchmesser der Ausgleichskugel D_a . Über alle Kugelpositionen im Messvolumen lag die Durchmesserabweichung zwischen $PS_{min} = -1,64$ mm und

$PS_{max} = 1,30$ mm bei einem Erwartungswert von $\mu_{PS} = -0,49$ mm und einer Standardabweichung von $\sigma_{PF} = 0,68$ mm.

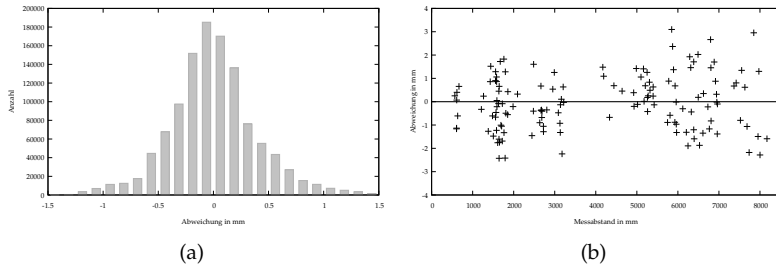


Abbildung 3.1: Ergebnisse der Messungen nach VDI/VDE 2617: (a) Histogramm der Antastabweichung im Intervall von 0,5 mm, (b) Darstellung der Längenmessabweichungen im Verhältnis zu gemessenen Längen.

Die zweite Kenngröße nach VDI/VDE 2617 ist die *Längenmessabweichung*, die das 3D-Abweichungsverhalten im gesamten Messvolumen angibt. Zur Bestimmung wurden wiederum Kalibrierkugeln mit einem Radius von 50 mm so im gesamten Messvolumen des Inspektionssystems verteilt, dass Abstände entlang der Raumachsen und der Volumendiagonalen gemessen werden konnten. Die Referenzwerte wurden ermittelt, indem die Position der Kugeln mit einem Laser-Tracker *Leica AT901 LR* angetastet und die Abstände berechnet wurden. Dieses Verfahren ersetzt den geforderten Längenmaßstab. Die Längenmessabweichung E ergibt sich aus der maximalen Differenz zwischen tatsächlichen und gemessenen Kugelzentren. Zur Ermittlung der Kenngröße wurde die Kalibrierkugel in allen Raumecken und an Zwischenpositionen entlang der Raumkanten positioniert. Insgesamt ergaben sich 12 Positionen, bei denen die Kugel wiederum jeweils aus drei Richtungen mit dem 3D-Sensor erfasst wurde. Eine Ausgleichskugel mit festem Radius wurde in die Messdaten eingepasst und es wurden alle Abstandskombinationen berechnet. Die resultierenden Längenmessabweichungen sind in Abb. 10.1(b) visualisiert.

Die maximale Längenabweichung beträgt im gesamten Volumen $E_{max} = 3,10$ mm bei einem Erwartungswert von $\mu_E = -0,03$ mm und einer Standardabweichung von $\sigma_{PF} = 1,17$ mm.

Bei der Auswertung der Messungen fällt auf, dass das System lokal betrachtet einen negativen Skalierungsfehler besitzt. Der Kugeldurchmesser wird unabhängig von der Position im Messvolumen tendenziell zu klein gemessen. Global betrachtet lässt sich für das gesamte Messsystem feststellen, dass der Längenmessfehler annähernd gleichverteilt ist und nur einen sehr geringer Linearitätsfehler auszumachen ist. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Messfehler insbesondere durch das Outside-In-Tracking verursacht wird, welches in dem Volumen unterhalb des Portals statt findet. Die absolute Portalposition, die per Inside-Out-Tracking berechnet wird, auf den Schienen scheint einen eher geringen Einfluss auf die Unsicherheit des Systems zu haben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein System vorgestellt, mit dem große Bauteile geometrisch auf Abweichungen inspiziert werden können. Die Inspektion erfolgt interaktiv durch Nutzung von Augmented Reality und dimensioneller Oberflächenmessung mit einem fusionierten Kamera-Phasenshift-Sensor. Per Augmented Reality lassen sich recht zügig geometrische Abweichungen erkennen, die dann metrisch mit einem 3D-Sensor gemessen werden können. Die Lage des Sensors wird innerhalb eines Portals durch ein externes, optisches Tracking-System erfasst. Gleichzeitig erfasst das Tracking-System seine eigene Lage. Outside-In und Inside-Out-Tracking werden somit mit einem einzigen System erreicht. Die Systemgenauigkeit ist für das Szenario der Rohteilüberprüfung in der CNC-Bearbeitung ausreichend. Weiter Arbeiten werden sich mit der Optimierung der LED-Anordnung am Sensor beschäftigen, um zu gewährleisten, dass auch unter ungünstigen Verdeckungssituationen stabile Ergebnisse erreicht werden können.

5 Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen auf Arbeiten, die im Forschungsprojekt *Zwanzig20 - Allianz 3Dsensation: 3D-KOSYMA*, FKZ 03ZZ0446H durch das BMBF gefördert wurden. Die Autoren möchten sich für die Unterstützung bedanken.

Literatur

1. W. Chang, J. Hsu, and B. Hsu, "3d scanning system of structured light for aiding workpiece position of cnc machine tool," in *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, 2018, pp. 388–391.
2. H. Ben Abdallah, I. Jovančević, J.-J. Orteu, and L. Brèthes, "Automatic inspection of aeronautical mechanical assemblies by matching the 3d cad model and real 2d images," *Journal of Imaging*, vol. 5, no. 10, p. 81, 2019.
3. T. Kersten, D. Starosta, and M. Lindstaedt, "Zum genauigkeitspotential aktueller handgeführter 3d-scanner," in *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, 2018.
4. E. Lilienblum and B. Michaelis, "Optical 3d surface reconstruction by a multi-period phase shift method," *JCP*, vol. 2, no. 2, pp. 73–83, 2007.
5. A. M. Aurand, J. S. Dufour, and W. S. Marras, "Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume," *Journal of Biomechanics*, vol. 58, no. 1, 2017.
6. P. Eichelberger, M. Ferraro, U. Minder, T. Denton, A. Blasimann, F. Krause, and H. Baur, "Analysis of accuracy in optical motion capture—a protocol for laboratory setup evaluation," *Journal of biomechanics*, vol. 49, no. 10, pp. 2085–2088, 2016.
7. T. Dunker and S. Sperling, "A calibration strategy for systems with 2-d laser sensors," in *10th IMEKO Symposium Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry*, 2011, pp. 265–272.
8. S. Sauer, T. Dunker, and M. Heizmann, "Ein Framework zur Simulation optischer Sensoren," in *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019*. Nürnberg: AMA, 2019.
9. VDI Verband Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik, "VDI-Richtlinie 2617 Blatt 6.2: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung," 2005.