

KAMERABASIERTE BESTIMMUNG DER POSITION UND ORIENTIERUNG EINES ENDEFFEKTORS

C. Nißler, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Robotik und Mechatronik
Münchner Str. 20, 82234 Weßling, Deutschland

G. Braun, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie
Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

F. Krebs
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie
Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gehören heute zu den wichtigsten Werkstoffen für den Bau von Flugzeugen. Dieser Anteil dieses Leichtbauwerkstoffes, welcher sich durch ein besonders günstiges Verhältnis von zulässiger Beanspruchung zu Gewicht auszeichnet, wird zukünftig vermehrt in Flugzeugen eingesetzt werden. Diese Tendenz beruht auf die stetig wachsenden Anforderungen an Bauteilwerkstoffe in diesem Bereich. Die wachsenden Qualitätsanforderungen seitens des Marktes, bei gleichzeitig steigendem Preisdruck, lassen eine Automatisierung des Produktionsprozesses von CFK-Bauteilen notwendig werden. Durch die hohen geforderten Stückzahlen sowie steigenden Genauigkeitsanforderungen wird der Einsatz von Industrierobotern sinnvoll. Zur Steigerung der Arbeitsgenauigkeit von Robotern entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt im Rahmen einer internen Kooperation einen prototypischen Endeffektor für die kamerabasierte Bestimmung der Position und Orientierung von Endeffektoren im Raum. Dieser Artikel beschreibt die vorhandene Prozessumgebung, den konstruktiven Aufbau des Endeffektors sowie erste Messungen und die Auswertung dieser Messergebnisse

1. EINLEITUNG

In Zukunft wird der weltweite Bedarf an neuen Großraumflugzeugen signifikant ansteigen durch die steigende Zahl von Fluggästen [1].

Hohe Treibstoffkosten und steigende Anforderungen hinsichtlich der Reduktion des Schadstoffausstoßes werden weiterhin zu einem beschleunigten Ersatz älterer Flugzeugtypen durch neue umweltfreundlichere Typen führen.

Der Bau von leichteren und somit umweltfreundlicheren Flugzeugen ist durch die Nutzung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen möglich. Leichtere Flugzeuge ermöglichen einen geringeren Kraftstoffverbrauch und somit einen geringeren Schadstoffausstoß sowie eine Kosteneinsparung durch geringeren Kraftstoffverbrauch.

Der Herstellungsprozess von kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen ist derzeit allerdings kostspielig, was sich bei steigendem Preisdruck im Markt ungünstig auswirkt. Neben dem steigenden Preisdruck fordert der Markt weiterhin u. a. aus oben genannten Gründen eine höhere Ausbringung pro Zeiteinheit. Zusätzlich steigen die Qualitätsanforderungen an das Produkt stetig.

Diese Markterfordernisse können durch die derzeit vor-

herrschende manuelle Fertigung nicht in dem geforderten Maße befriedigt werden. Um den wirtschaftlichen und technischen Marktanforderungen gerecht zu werden ist ein automatisierter Fertigungsprozess notwendig.

Für die Realisierung eines solchen Prozesses ist es sinnvoll zunächst einen Prozess unter Berücksichtigung der vorhandenen Kenntnisse zu konzipieren und dieses Wissen zusammenzuführen [2]. Werden Informationsdefizite bei der Realisierung des Gesamtprozesses deutlich so sind diese durch gezielte Forschung zu beheben.

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt verschiedene Prozessketten für die automatisierte Produktion von thermoplastischen und duroplastischen Bauteilen.

Innerhalb dieser Prozessketten kommen unter anderem aufgrund ihrer hohen Flexibilität an verschiedenen Stellen Industrieroboter zum Einsatz. Dabei werden diese Roboter sowohl direkt für die Herstellung von Bauteilen verwendet als auch für Qualitätssicherungsaufgaben. Markant für diese Roboter ist es das sie eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweisen aber eine relativ geringe absolute Genauigkeit [3].

Industrietaugliche Prozesse benötigen allerdings eine hohe Absolutgenauigkeit des Roboters, z. B. um einen

CFK-Zuschnitt genau in eine Form ablegen zu können. Dies ist notwendig da die Festigkeit dieses Zuschnittes faserwinkelabhängig sein kann [2] und diese gerichtete Festigkeit entscheidend für den späteren Einsatz des Bauteils sein kann. Aus diesem Grund evaluiert das ZLP verschiedene Methoden zur Verbesserung der Absolutgenauigkeit unter Prozessbedingungen.

Eine Methode die hier vorgestellt wird ist eine Präzisionssteigerung basieren auf visueller Objekterfassung.

Einige Ansätze der visuellen Objekterkennung benutzen charakteristische Punkte im Kamerabild, die detektiert werden. Ein Beispiel ist KLT [4]. Anstatt punkthafter Objekte nutzte Azad u. a. 3D-Modelle durch Bestimmung der Kanten und Berechnung des Abstandes zu den korrespondierenden Kanten des Kamerabildes [5]. Statt der Auswertung von natürlichen Merkmalen in Kamerabildern sind heute Methoden, welche künstliche Merkmale nutzen sehr beliebt, wie z. B. das ARTag [6] und das AprilTag [7] System. Diese erwiesen sich als robust und genau für die Bestimmung von Position und Orientierung zwischen Kamera und Marker. Diese sind weit verbreitet in der mobilen Robotik [8].

2. ANWENDUNG

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) entwickelt eine Prozesskette für die automatisierte Herstellung von großen Bauteilen unter Verwendung von Preforms. Eine vereinfachte Prozesskette ist auf BILD 1 dargestellt.

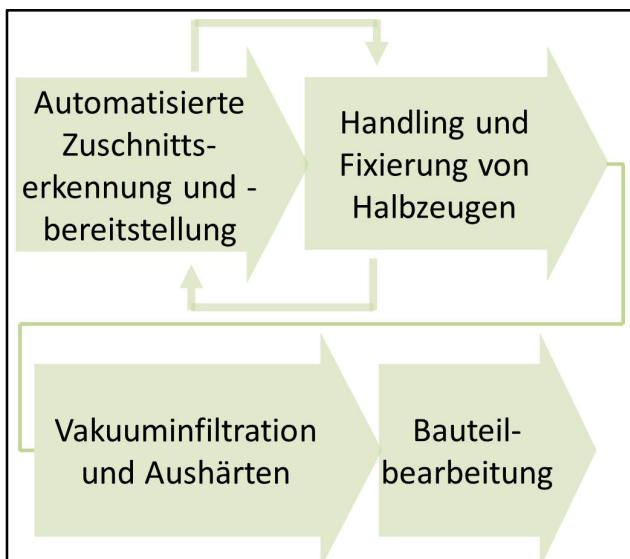


BILD 1. Beispiel für eine Prozesskette für die automatisierte preform-basierte Bauteilherstellung.

Der erste hier dargestellte Schritt ist die automatisierte Bereitstellung des Zuschnittes auf einer grob definierten Ablagefläche sowie die Erkennung der Zuschnittskontur. Hierbei wird auch die Position und Orientierung des Zuschnittes bestimmt.

Im zweiten Schritt wird das Preform mit Hilfe der gewonnenen Informationen aufgenommen und auf die dafür vorgesehene Ablagefläche z. B. eine Werkzeugform definiert abgelegt und gegebenenfalls fixiert. Hierbei werden beide Prozessschritte mehrmals nacheinander durchlau-

fen, da mehrere Zuschnitte in definierter Position und Orientierung sinnvoll abgelegt werden müssen damit das Bauteil später die gewünschten Festigkeitseigenschaften aufweist.

Im darauffolgenden dritten Schritt erfolgen die Vakuuminfiltration und die Aushärtung

Im vierten Schritt schließlich erfolgt die Bearbeitung des ausgehärteten Bauteils um die Maßhaltigkeit und eine angemessene Kantenqualität sicherzustellen.

Der erste und er zweite Schritt wird am ZLP mittels einer roboterbestückten Multifunktionalen Zelle (MFZ) (s. a. BILD 2) durchgeführt. Für diese ersten beiden Prozessschritte sind Roboter bestens geeignet durch ihre Flexibilität, ihre Kostenvorteile bei hohen Bauteilstückzahlen und der konstanten Qualität der Arbeitsergebnisse.



BILD 2. Die Technologie Erprobungszelle (TEZ) im Vordergrund mit zwei Robotern auf einer Linearachse und mit einem Robotik-Portalsystem (MFZ) im Hintergrund.

Das dargestellte Robotik-Portalsystem (MFZ) sowie die beiden Roboter auf der Linearachse (TEZ) weisen eine hohe Flexibilität auf aber auch eine lastabhängige Deformation. Für die Herstellung von Bauteilen mittels Preforms ist es notwendig die absolute Genauigkeit der Roboter zu verbessern.

Deshalb evaluiert das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt verschiedene Methoden zur Erhöhung der Absolutgenauigkeit von Industrierobotern.

Die unterschiedlichen Mess- oder Berechnungsmethoden liefern Werte für die Position und Orientierung. Diese bereitgestellten Daten können dann für die Korrektur auf die Sollwerte der oben genannten Größen verwendet werden.

Die erste Methode ist die Berechnung der lastabhängigen Deformation. Die Deformation der Roboter sowie der weiterhin vom Kraftfluss durchströmten Komponenten, wie z. B. die Linearachse (Achse 7) oder das Portalsystem können nur mit rechenintensiven Algorithmen berechnet werden. Dabei können die Korrekturwerte für Position und Orientierung nur dann berechnet werden wenn alle Spannungen nach Betrag und Typ bekannt sind zu einer bestimmten Zeit. Dies ist derzeit noch nicht in Echtzeit möglich.

Als zweite Methode ist hier die Erfassung und die Korrektur der auftretenden Abweichungen durch einen Lasertracker zu nennen. Der Lasertracker benötigt einen speziellen Trackersteuerungssensor welcher am Roboter befestigt

tigt ist. Der Roboter samt Trackersteuerungssensor ist sehr teuer und der Lasertracker benötigt eine ungestörte freie Sicht auf den Trackersteuerungssensor. Wird diese Sicht unterbrochen, so kann mittels Lasertracker nicht länger die aktuelle Position und Orientierung bestimmt werden. Diese Informationen können dann nicht länger an den Roboter übertragen werden und zusätzlich muss der Tracker den Trackersteuerungssensor neu lokalisieren, was einige Zeit in Anspruch nehmen kann.

Die dritte Methode ist die kamerabasierte Bestimmung von Position und Orientierung eines Endeffektors im Raum. Die Kamera am Endeffektor analysiert hierfür die codierten Bilder der Marker (BILD 5). Der hier beschriebene Endeffektor bietet die Möglichkeit sowohl Position und Orientierung zu bestimmen.

Das Ziel dieser ersten Arbeit ist es, die Prozessumgebung darzustellen, die Konstruktion des Endeffektors unter Berücksichtigung der Prozessumgebung zu beschreiben und die Genauigkeit der kamerabasierten Messungen des Endeffektors in der Prozessumgebung darzulegen.

Besonders die ersten beiden Schritte der Prozesskette (BILD 1) benötigen eine hohe Arbeitsgenauigkeit der Industrieroboter.

Innerhalb des DLR können einige der in BILD 1 beschriebenen Arbeitsschritte mit der Multifunktionalen Zelle (MFZ) (BILD 2) realisiert werden.

2.1. PROZESSUMGEBUNG

Aus Kapazitätsgründen wurden die ersten Tests in der Technologie Erprobungszelle durchgeführt (BILD 3, BILD 2, Roboter auf Linearachse).

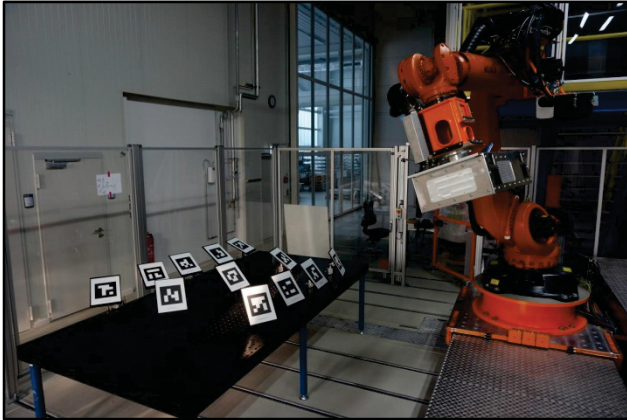


BILD 3. Die Prozessumgebung mit dem Endeffektor am Industrieroboter (KUKA KR 210) und mit den am Tisch befestigten AprilTag-Markern.

Die Testumgebung ist sauber und gut beleuchtet. Der Industrieroboter auf der Linearachse bietet zahlreiche Möglichkeiten der Positionierung und Orientierung des Endeffektors.

Die Netzwerkverbindung, die Stromversorgung und die Druckluftversorgung erfolgen über das Roboterequipment. Die Marker sind beweglich an den Tisch angebracht. Der kinematische Aufbau dieser Verbindung ist auf BILD 5 dargestellt.

Die Umgebungstemperatur ist annähernd konstant durch Einsatz einer Klimaanlage. Die Luft kann aber CFK-Staub

enthalten. Dieser Staub kann Schaden an elektrischen Geräten verursachen wie z. B. an Computern.

2.2. KONSTRUKTIVER AUFBAU

Das eigentliche Messsystem besteht aus dem Endeffektor und den verschiedenen Markern. Für die Bestimmung der Position und Orientierung sind mehrere unterschiedliche Marker notwendig (BILD 3).

Der konstruktive Aufbau der beiden Komponenten wird größtenteils bestimmt durch die Umgebungsbedingungen und (siehe auch Kap. 2.1) und die Entwicklungsziele.

Einen Überblick über den konstruktiven Aufbau des Endeffektors bietet BILD 4.

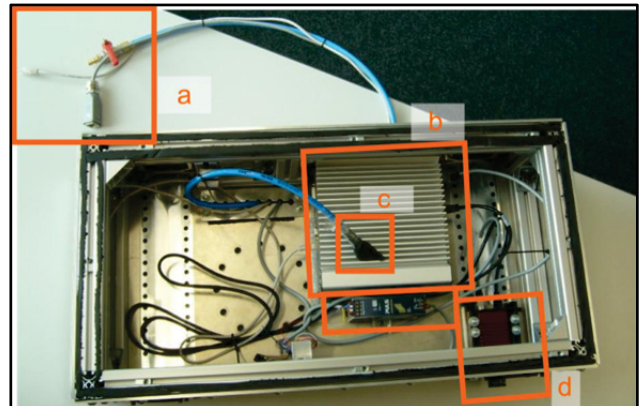


BILD 4. Konstruktiver Aufbau des Endeffektors: (a) Ethernet-Kabel, Stromversorgung, Druckluftversorgung; (b) Embedded PC; (c) Druckluft-Kühlschlauch; (d) Kamera

Der Endeffektor besteht aus einem Gehäuse welches einfach durch Grifföffnungen gehandhabt werden kann. Dieses Gehäuse besteht aus einem soliden Aluminiumrahmen mit zahlreichen Befestigungsmöglichkeiten. Die Aluminiumwandbleche sind mit Rahmen verschraubt und durch schwarzes Dichtband gegen den Rahmen abgedichtet.

Das Gehäuse hat vier bearbeitete Aussenflächen. Auf diese Flächen kann jeweils ein Trackersteuerungssensoren (Leica T-MAC-Sensor) angebracht werden. Dadurch ist es möglich hochgenaue Lasertrackermessungen für den Vergleich mit den Kameramessungen heranzuziehen. Dabei wird davon ausgegangen das die Lasertrackermessungen die exakten Werte bereitstellen.

Das Gehäuse nimmt den Auswertecomputer, die maximal vier Kameras sowie ein Netzteil auf.

Der Auswertecomputer (BILD 4, (b)) enthält einen Intel Core i7 Quad-Core-Prozessor und eine SSD-Festplatte und arbeitet mit dem Betriebssystem Windows 7 embedded. Weiterhin ist der Computer stoß- und vibrationsbeständig und damit sehr gut ausgerüstet für diese Anwendung.

Die Kamera ist eine Monochromkamera (BILD 4, (d)) mit einem 2,3 Zoll CCD-Sensor. Dieser hat eine Auflösung von 1600 x 1200 Pixeln und eine Bildrate von bis zu 66 Bildern pro Sekunde. Die Kamera hat ein Gigabit-Ethernet Interface. Die angebrachte, austauschbare Linse hat eine Brennweite von 35mm. Die Kamerabindungen können ausgetauscht werden, wodurch es auch möglich ist andere Kamerabauarten zu verwenden.

Das Gehäuse hat jeweils zwei Öffnungen an den Längsseiten für das Herausführen der Kameralinse und je zwei Luftaustauschöffnungen mit schwarzem Lüftungsgittern sowie Filtern (BILD 3, BILD 4). Innerhalb des Gehäuses können die Kameras entlang der Kameralängsachse verschoben werden. Dies ermöglicht es Linsen mit unterschiedlichen Längen einzusetzen und gleichzeitig die Außenabmessungen des Endeffektors konstant zu halten. Dies wiederum dient auch dazu die Kameraelektronik und die Optik gegen Kollisionen mit Objekten außerhalb des Endeffektors maximal zu schützen.

Das Eindringen von elektrisch leitendem Staub wird durch einen Überdruck im Gehäuseinneren durch Druckluft verhindert. Dadurch fließt Luft durch die Kameraöffnungen sowie durch die Luftaustauschöffnungen nach außen. Dieser Luftstrom sorgt weiterhin dafür das sowohl die Kamera als auch der Auswerterechner gekühlt werden (BILD 4, (a) und (c)).



BILD 5. Die Befestigung des AprilTag-Markers auf der Marker Grundplatte (links) sowie das bewegliche Verbindungsgelenk und die Fußplatte.

3. EXPERIMENTE

3.1. VERSUCHSZIEL

Zur Feststellung der erreichbaren Genauigkeit wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Um Vergleichsdaten zu erhalten stand ein Lasertracker (LEICA AT901) zur Verfügung. Dieser ermöglicht das dynamische Messen und automatische Nachverfolgen eines Messpunktes mit einer Genauigkeit von $10,5\mu\text{m}$ bei einem Messabstand von 1 m und eine Winkelauflösung von $0,14\text{ arcsec}$. [9]

3.2. VERSUCHSVORBEREITUNG

Auf einem Messtisch wurden zehn spezielle Messmarker, sogenannte AprilTags, angebracht. Diese Marker ermöglichen eine präzise und robuste Lokalisierung anhand Kamerabilder. Des Weiteren wurde ein Roboter mit dem in Kapitel 2 beschriebenen, neu entwickelten Endeffektor verwendet. Als Roboter wurde hierbei ein KUKA KR210 eingesetzt. In BILD 3 ist der Versuchsabbau abgebildet.

3.2.1. Kalibrierung

Im Umfeld der Leichtbauproduktion ist es wichtig, eine genaue Absolutpositionierung der Roboter zu ermöglichen. Hierzu ist es erforderlich, ein gemeinsames (Welt-) Koordinatensystem zu bestimmen. Dies setzt voraus, dass die Position der Marker und deren Größe genau bestimmt werden. Dieser Prozess muss einmalig vor Beginn der Messreihen durchgeführt werden und wird als Markerkalibrierung bezeichnet. Hierbei wird zum Beispiel mit Hilfe eines Lasertrackers die Lage (Translation und Rotation) der Marker zueinander exakt gemessen. Ebenso wurden die Dimensionen der Markerplatten mit Hilfe eines Messmikroskops präzise bestimmt.

Um präzise Messungen mittels bildverarbeitender Methoden zu erhalten ist eine Kalibrierung des Kamerasystems notwendig. Hierbei werden die sogenannten intrinsischen Parameter der Kamera bestimmt, also die inneren Parameter der Kamera, welche eine geometrische Abbildung eines Objekts mathematisch beschreibt, so zum Beispiel die Brennweite und die Linsenverzerrungen des verwendeten Kamera- und Objektivsystems.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der verwendete Lasertracker und das Kamerasystem kein gemeinsames Koordinatensystem verwenden. Dies liegt darin begründet, dass der Lasertracker einen Trackersteuersensor (den sogenannten T-MAC) als Referenzpunkt, auf dem Endeffektor des Roboters nachverfolgt und sich auf dieses Koordinatensystem bezieht, während ein Kamerasystem ein Koordinatensystem verwendet, dessen Ursprung im Bildmittelpunkt des Kamerachips liegt. Die Transformation zwischen diesen Koordinatensystemen muss ebenfalls vor Beginn der Messungen bestimmt werden.

Die Bestimmung der Kameraparameter und der Transformation zwischen Kamera- und Lasertrackerkoordinatensystemen kann gleichzeitig erfolgen. Dieses Verfahren wird auch als Hand-Auge-Kalibrierung [10] [11] bezeichnet. Hierbei werden viele Bilder von einem genau bekannten Kalibrierungsobjekt, in unserem Fall ein hochpräzise vermessenes Schachbrettmuster, aufgenommen. Gleichzeitig werden zu jedem Aufnahmeschritt die vom Lasertracker eingemessenen Posen der Endeffektors aufgenommen. Der Kalibrierungsalgorithmus findet dann die optimale Lösung sowohl für die Kameraparameter als auch für die Transformation zwischen Kamerasystem und T-MAC. Als Kalibrierungsprogramm wird die DLR Callab und Calde Software [12] eingesetzt.

3.3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

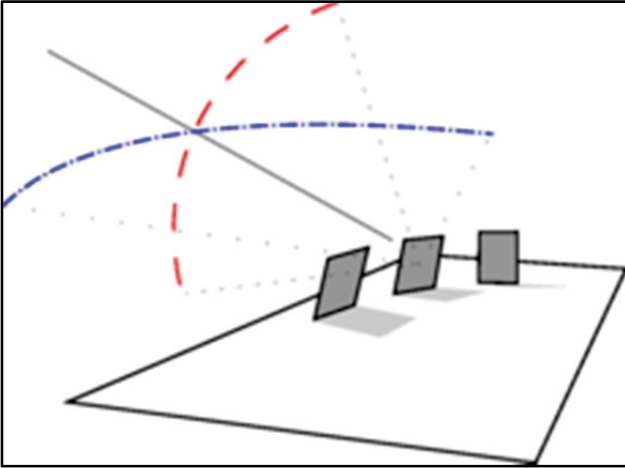


BILD 6. Die verwendeten Messfahrten: horizontaler Halbkreis (blau/gestrichpunktet); vertikaler Halbkreis (rot/gestrichelt); Linearfahrt (grün/durchgezogen)

Um möglichst realitätsnahe Messungen zu erhalten, wurden drei Bahnen für Messfahrten entwickelt (BILD 6): ein horizontaler Halbkreis, ein vertikaler Halbkreis sowie eine sich dem Messbereich annähernde Linearfahrt. Diese Bahnen werden im Laufe der Messungen mehrfach abgefahren und in regelmäßigen Abständen die Messungen basierend auf dem Kamerasystem sowie zeitsynchron die Messungen aus Lasertrackerdaten abgespeichert.

3.3.1. BILDVERARBEITUNG

Zur Erkennung der Marker wird eine leicht angepasste C++ Portierung der Original AprilTag Software verwendet. Das AprilTag Marker System wird verwendet, da es eine Verbesserung von vorherigen Markersystemen darstellt und eine höhere Präzision und bessere Robustheit als zum Beispiel das vergleichbare ARTag System bietet.

Das AprilTag System ermöglicht individuelle 6D-Messungen für jeden Marker basierend aus den Kameramessungen. Somit werden zu jedem Zeitpunkt der Messung Rotationen und Translationen sowie die entsprechende eindeutige Identifikation jedes Markers gespeichert. Zeitsynchron werden die Messungen des Lasertrackers zu jedem Messzeitpunkt aufgezeichnet.

3.4. VERSUCHSERGEBNIS

Als Bezugskordinatensystem beziehungsweise Weltkoordinatensystem wird das Koordinatensystem des Lasertrackers gewählt (ohne Einschränkung der Allgemeinheit). Die zu untersuchende Größe ist somit die Transformation vom Lasertracker zum Kamerakordinatensystem T_{lc} basierend auf der Posenschätzung des Bildverarbeitungsalgorithmus. Die Vergleichsgröße ist dieselbe Transformation vom Lasertracker zum Kamerakordinatensystem \tilde{T}_{lc} , jedoch basierend auf den Messungen des Lasertrackers und den Ergebnissen der Kalibration.

Ausgewertet soll der absolute Fehler zwischen den oben genannten Transformationen, also der Transformation basierend auf den Bildverarbeitungsdaten und der Transformation basierend auf den Messdaten des Lasertrackersystems. Es ergibt sich als Fehlermatrix:

$$E = T_{lc} * \tilde{T}_{lc}^{-1}$$

Diese Fehlermatrix kann in einen translatorischen Vektor t_E und einen Rotationsanteil aufgeteilt werden. Der Rotationsanteil wird in Vektordarstellung als Vektor v und Drehwinkel α beschrieben. Damit ergibt sich als Fehlermetrik für den translatorischen Fehler:

$$e_t = \|t_E\|_2$$

Analog ergibt sich für den Winkelfehler:

$$e_r = |\alpha|$$

TAB 1 Überblick über die Versuchsergebnisse

	Min Fehler [mm]	Avg Fehler [mm]	Max Fehler [mm]	Min Fehler [°]	Avg Fehler [°]	Max Fehler [°]
Versuch 1 (horiz. Halbkreis)	5,824	16,830	38,300	0,192	0,316	0,739
Versuch 2 (vertik. Halbkreis)	3,736	15,920	32,461	0,173	0,337	0,633
Versuch 3 (Linearfahrt)	1,147	14,678	40,198	0,148	0,313	0,678

Die translatorischen Fehler und Winkelfehler für alle drei Versuchsfahrten sind in Bild 7 dargestellt. Die erste Zeile stellt dabei die horizontale Halbkreisfahrt, die zweite Zeile die vertikale Halbkreisfahrt und die dritte Zeile die Linearfahrt dar. Die linke Spalte beschreibt hierbei die translatorischen Fehler in Millimeter, während die rechte Spalte die Drehwinkelfehler in ° beschreibt.

Ebenso dargestellt ist der maximale und minimale Fehler für jeden Messpunkt (Fehlerbalken für jeden Messbalken), sowie der Durchschnitt über alle Messungen einer Messreihe (blaue Linie).

In Tabelle 1 ist ein Überblick über die erreichten minimalen, maximalen und Durchschnittsfehler für alle Versuchsreihen zusammengestellt.

Der translatorische Fehler schwankt von 1,1mm bis 38,3mm und beträgt im Durchschnitt für alle Messungen ungefähr 16 mm. Wie erwartet nimmt der Fehler bei zunehmendem Abstand zwischen Marker und Kamerasystem zu.

Ein interessanter Fall stellt die Linearfahrt auf die Marker zu dar (untere Zeile in Bild 7): Der Fehler nimmt wie erwartet ab, bis er ein Minimum von circa 5mm erreicht, nimmt bei weiter abnehmendem Abstand jedoch wieder zu. Dies lässt sich mit den optischen Eigenschaften des Kamerasystems erklären: Eine Kamera kann nicht einen unendlich großen Raum scharf abbilden. Beim gezeigten Fall liegt nun das Problem vor, dass bei zu geringem Abstand das Bild nicht fokussiert werden kann und das Bild somit nicht mehr scharf abgebildet wird. Dies hat negative Einflüsse für das Bildverarbeitungssystem, daher wird der Fehler wieder größer.

Zu den Winkelfehlern lässt sich sagen, dass sie insgesamt sehr gering sind und der Einfluss der Translationsfehler deutlich überwiegt. Sie schwanken nur zwischen 0,2° und 0,7° und mitteln sich zu 0,3° für alle Messungen und scheinen auch nicht so stark vom Abstand zwischen Kamerasystem und Marker abzuhängen.

4. DISKUSSION

In dieser Veröffentlichung wurde ein neu entwickelter Endeffektor gezeigt, mit welchem eine globale Position und Rotation zu einem beliebig festgelegten Welt-Koordinatensystem bestimmt werden kann. Die Positions- und Rotationsbestimmung erfolgt hierbei allein auf Grund visueller Informationen eines internen Kamerasystems. Des Weiteren arbeitet der Endeffektor komplett autark, das heißt alle Berechnungen und Bildverarbeitungsschritte finden „on board“ statt.

Der Endeffektor ist speziell für den Einsatz im Leichtbauproduktionsumfeld konzipiert, und ist so zum Beispiel gegen eindringende CFK Partikel geschützt.

Zusätzlich wurde in der vorliegenden Publikation die erreichbare Genauigkeit bei realitätsnahen Versuchen in einer Roboterzelle, wie sie auch in der Leichtbauproduktion verwendet wird, gezeigt.

5. AUSBLICK

Für zukünftige Versuche wäre es wünschenswert, auch Informationen zur Genauigkeit bei dynamischen Messungen zu erhalten. Das gezeigte System erlaubt dynamische Messungen ohne Änderung von Komponenten, die nur von der Frequenz der Kameraaufnahme beschränkt werden. Dies benötigt jedoch eine hochpräzise Zeitsynchronisierung mit den Vergleichsdaten des Lasertrackersystems, welche zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verfügbar war.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Verbesserung der Genauigkeit durch Optimierungsmethoden basierend auf dem Bildverarbeitungssystem. Zu erwähnen wären hier zum Beispiel statistische Methoden wie der sogenannte Random Sample Consensus (RANSAC) Algorithmus, der auf Grund der Überbestimmtheit des Gleichungssystems eine Minimierung des Fehlers ermöglicht.

Eine weitere Möglichkeit der Genauigkeitsverbesserung ist der Einsatz zusätzlicher Sensorik wie weiterer Kameras, Inertialsensoren sowie Berücksichtigung der Daten aus der Roboterkinematik.

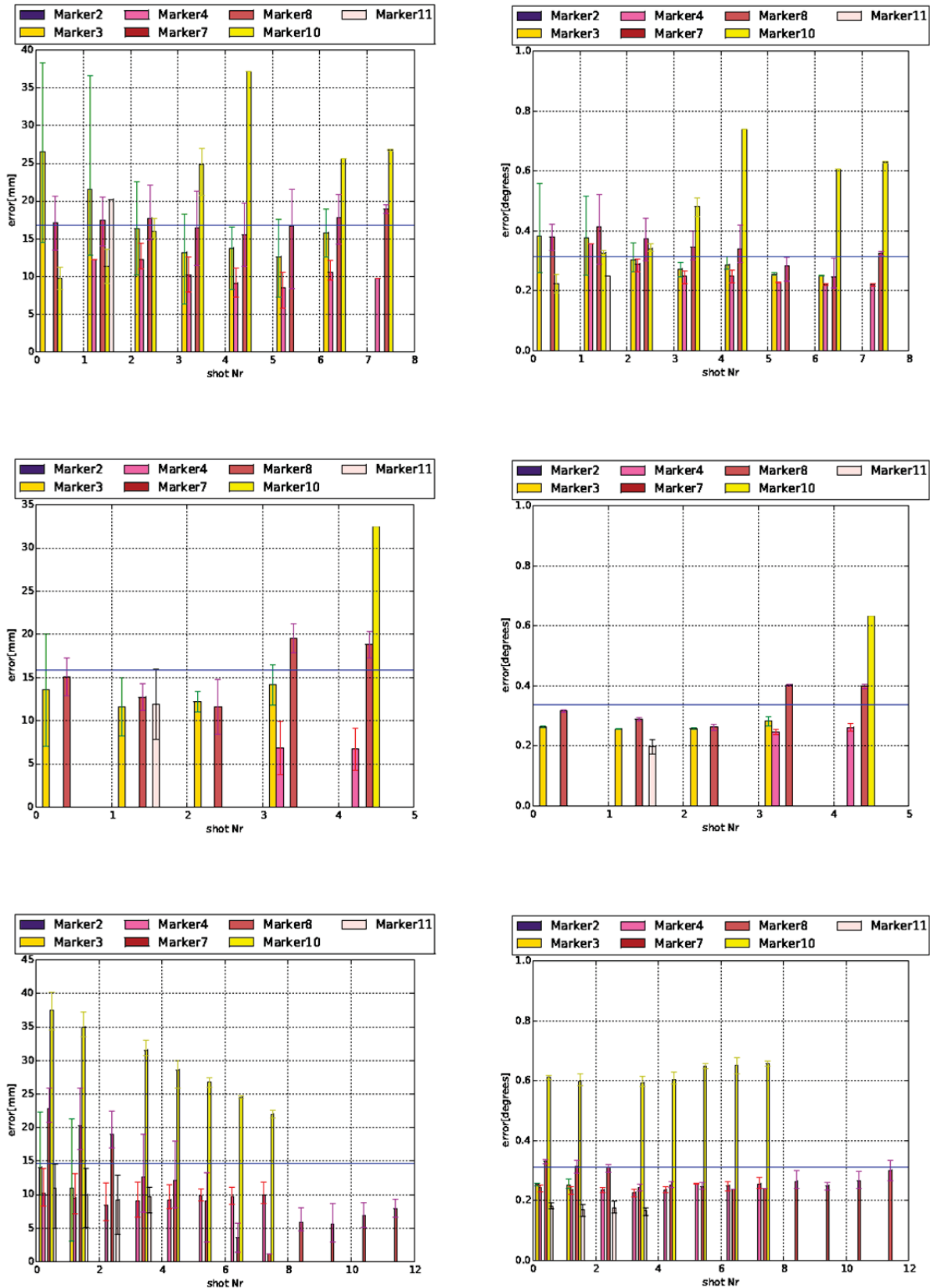


Bild 7 Mittelwerte des translatorischen Fehlers (linke Reihe) und des rotatorischen Fehlers (rechte Spalte) über alle Messungen basierend auf den individuellen Markermessungen für
 obere Reihe: horizontaler Halbkreis
 mittlere Reihe: vertikaler Halbkreis
 untere Reihe: Linearfahrt
 Hinweis: die Fehlerbalken stellen den Maximal und Minimalfehler dar und die blaue Linie ist der Durchschnitt über alle Messungen

Literaturverzeichnis

- [1] A. Group, „Airbus global market forecast 2010 2029,“ Tech. Report, 2010.
- [2] D. Biermann, W. Hufenbach und G. Seliger, „Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstaerkter Hochleistungswerkstoffe,“ Technische Universitaet Dresden - Institut fuer Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden, 2008.
- [3] F. Krebs und S. Nuschele, „Roboter prueft Qualitaet waehrend der Produktion,“ Maschinenmarkt, 2012.
- [4] M. A. Fischler und R. C. Bolles, „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,“ in *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, 1981.
- [5] P. Azad, D. Munch, T. Asfour und R. Dillmann, *6-DOF Model-based Tracking of Arbitrarily Shaped 3D Objects*, 2011.
- [6] M. Fiala, „Artag, a fiducial marker system using digital techniques,“ *Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 590–596, 2005.
- [7] E. Olson, „Apriltag: A robust and flexible visual fiducial system,“ *Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3400–3407, 2011.
- [8] E. Olson, J. Strom, R. Goeddel, P. Morton, P. Ranganathan und A. Richardson, „Exploration and mapping with autonomous robot teams,“ in *Communications of the ACM*, Bd. 56, 2013, p. 62–70.
- [9] LEICA Geosystems, „PCMM system specifications,“ 2013.
- [10] K. Strobl und K. Hirzinger, „Optimal many-eye calibration,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006.
- [11] K. Strobl und G. Hirzinger, „More accurate camera and hand-eye calibrations with unknown grid pattern dimensions,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2008.
- [12] K. Strobl, W. Sepp, S. Fuchs und K. Arbter, "DLR CalDe and DLR CalLab," Oberpfaffenhofen, Germany, 2010.