



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Kalibriermethode für einen zwei-dimensionalen Laserliniensensor als Grundlage für robotergestützte Anwendungen

Measurement method of a two-dimensional laser line sensor as a basis for robot-assisted applications

Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, 66121 Saarbrücken, Deutschland, rainer.mueller@zema.de

Dr.-Ing. Matthias Vette-Steinkamp M. Eng., ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, 66121 Saarbrücken, Deutschland, matthias.vette@zema.de

Tobias Masiak M. Eng., ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, 66121 Saarbrücken, Deutschland, t.masiak@zema.de

Ali Kanso M. Sc., ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, 66121 Saarbrücken, Deutschland, a.kanso@zema.de

Kurzfassung

Der robuste Einsatz von mechatronischen Systemen, allen voran Robotersystemen, erfordert die Integration von zusätzlichen Sensoren, wie beispielsweise Laserliniensensoren und Kamerasystemen, um auf Abweichungen im Prozess reagieren zu können. Die Inbetriebnahme der einzelnen Module zu einem Gesamtsystem ist häufig zeitaufwendig und komplex. Daher werden einfache und genaue Methoden zum Einmessen benötigt, um die Vorteile der Sensoren im Prozess zu nutzen. Sollen Objekte im 3D-Raum oder Kalibriertargets mittels 2D-Sensoren, wie z. B. Laserliniensensoren, vermessen werden, ist die Bestimmung von zusätzlichen Randbedingungen notwendig. Das kinematische Problem der Robotersensorkalibrierung führt zu einer homogenen Transformationsgleichung der Form $AX=XB$, wobei A , X und B 4×4 homogene Matrizen sind. Dieser Artikel stellt ein innovatives Lösungskonzept mittels einer Kalibriermethode sowie einem Kalibriertarget zur Optimierung vor. Als Anwendungsbeispiel wird der vermessene Laserliniensensor in das Prozesswerkzeug einer Wickelapplikation sowie in einer Nietanwendung in der Flugzeugstrukturmontage implementiert.

Abstract

The robust deployment of mechatronic systems, especially robot systems, requires the integration of additional sensors, such as laser line sensors and camera systems, in order to react to disturbances. The commissioning of individual modules to form a complete system is often time consuming and complex. Therefore, simple and accurate calibration methods are needed to take the advantage of the sensors in the process. The calibration of 3D-sensors has already been studied by several scientists. If objects in 3D-space or calibration targets must be measured using 2D-sensors such as laser line sensors, then the determination of additional boundary conditions is necessary. The kinematic problem of robot sensor calibration leads to a homogeneous transformation equation of the form $AX = XB$, where A , X and B are 4×4 homogeneous matrices. This article presents an innovative solution concept for optimizing this problem. A calibration method and a calibration target are presented. As a case study, the measured laser line sensor is finally integrated into the process tool of a winding application as well as in a riveting station in aircraft structure assembly.

1 Einleitung

Ein Robotersystem besteht aus der Roboterkinematik, einem prozessspezifischen Endeffektor sowie allen Einrichtungen, Geräten oder Sensoren, die für den Roboter zur Ausführung der Aufgabe notwendig sind. Des Weiteren ist das mathematische Modell sowie die Steuerung von Sensoren, Aktoren und zusätzlicher Peripherie notwendig [1].

Das Vermessen von Werkzeugen, Sensoren und Objekten bezüglich des Roboters ist eine Grundaufgabe, die bei der Inbetriebnahme oder nach einer Rekonfiguration erfolgen muss. Bei den Sensoren kann man zwischen 3D-, 2D- und 1D-Sensoren unterscheiden. 3D-Sensoren

sind z. B. Tiefenbildkameras oder Stereokameras, die Messwerte in X-, Y- und Z-Koordinaten in Bezug zum Kamerakoordinatensystem liefern. 2D-Sensoren sind z. B. Laserliniensensoren oder 2D-Kameras, die Messwerte nur in zwei Koordinaten aufnehmen können. 1D-Sensoren sind häufig Laserabstandssensoren, die bei Roboterapplikationen oft verwendet werden. Die 6D-Pose-Parameter der 3D-Objekte lassen sich mithilfe der oben genannten 3D-Sensoren und Signalverarbeitungsalgorithmen einfach ermitteln.

Das Vermessen von Objekten mit 2D-Sensoren ist hingegen eine Herausforderung, da sich 6D-Pose-Parameter nicht auf direktem Weg mit 2D-Sensoren, wie z. B.

Laserliniensensoren, ermitteln lassen. Hierfür werden physikalische Merkmale auf der 3D-Objektebene benötigt. Laserliniensensoren werden zumeist zur Referenzierung, Inspektion von Prozessen sowie zum sensorischen Nachführen und Scannen von Bauteilen verwendet. Diese liefern 2D-Messdaten in X- und Z-Richtung des Sensorkoordinatensystems. Um die Messdaten des Sensors in das Roboterkoordinatensystem zu transformieren und somit in den dreidimensionalen Raum zu übertragen, muss die Position und Orientierung des Sensors bzgl. des Flanschkoordinatensystems des Roboters bestimmt werden. Hierfür gilt es, eine kinematische Gleichung in Form von Transformationsmatrizen zu lösen. 1D-Sensoren können wie der Tool Center Point (TCP) eines Werkzeugs einfach durch Hand-Auge-Kalibrierung und einer Messspitze vermessen werden, indem eine Referenz aus verschiedenen Posen des Roboters mindestens viermal angefahren wird.

Im Rahmen dieses Artikels wird eine intuitive Kalibrieremethode zum Vermessen eines 2D-Sensors bezüglich des Roboterflansches vorgestellt. Eine eindeutige und geschlossene Lösung wird basierend auf der Separation des Orientierungs- und Positionsgleichungssystems nach zwei Bewegungen des Roboterflansches unter Berücksichtigung der vordefinierten Randbedingungen abgeleitet [2]. Zur Minimierung der Einflüsse des Sensor- oder Umgebungsräuschens in der Roboterapplikation wird eine Lösung der kleinsten Fehlerquadrate nach der Durchführung mehrerer Messungen bestimmt [3]. Es wird eine Kalibrieremethode sowie ein Kalibriertarget vorgestellt. Als Anwendungsbeispiel wird der vermessene Laserliniensensor in das Prozesswerkzeug einer Wickelapplikation sowie in eine Nietanwendung in der Flugzeugstrukturmontage implementiert.

2 Vermessung des Laserliniensensors

Die Bestimmung der Position und Orientierung eines an einem Roboterflansch montierten 3D-Sensors ist in vielen Systemen bereits implementiert [2]. Das kinematische Problem der Robotersensorkalibrierung führt zu einer homogenen Transformationsgleichung der Form $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$. Wobei, \mathbf{A} , \mathbf{X} und \mathbf{B} 4×4 homogene Matrizen der Form

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_T & \underline{r}_T \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

sind. Wobei \mathbf{R}_T und \underline{r}_T jeweils die Drehmatrix und der Translationsvektor der homogenen Matrix \mathbf{T} sind. \mathbf{A} und \mathbf{B} repräsentieren die Transformationsmatrizen zwischen dem permanenten Flansch und dem Sensorkoordinatensystem in Bezug auf den Ausgangsflansch und in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem vor dem Bewegen des Roboterflansches. \mathbf{X} ist die Transformationsmatrix zwischen dem Sensorkoordinatensystem in Bezug auf das Flanschkoordinatensystem, also die zu bestimmende Matrix, um den Sensor zu kalibrieren (siehe Abbildung 1).

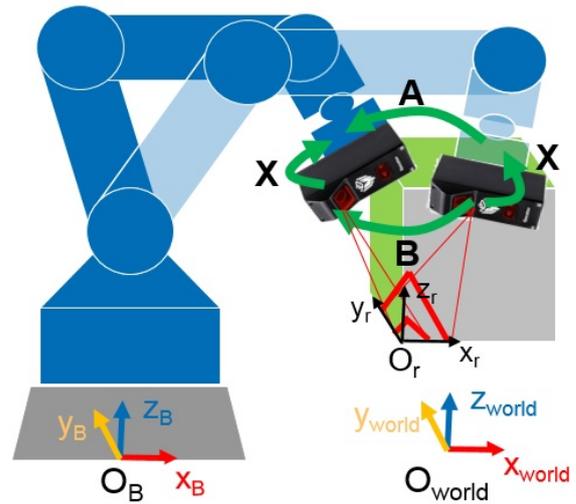


Abbildung 1 Vermessen eines Kalibriertargets mittels einem Laserliniensensor. Die Abbildung zeigt den montierten Sensor an einem seriellen Roboter in der initialen Pose sowie die Pose nach einer Bewegung des Roboters.

Shiu und Ahmad führten eine geschlossene Methode ein, um das System $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ [2] zu lösen. Die Lösung hat einen translatorischen und einen Rotationsfreiheitsgrad, solange die Rotation auf \mathbf{A} weder 0 noch π Radiant ist. Für ein eindeutiges \mathbf{X} sind zwei Roboterbewegungen notwendig, wobei angenommen wird, dass bei der Messung kein Rauschen vorhanden ist. Es kann ein System aus zwei Gleichungen aufgestellt werden:

$$\mathbf{A}_1\mathbf{X} = \mathbf{XB}_1; \mathbf{A}_2\mathbf{X} = \mathbf{XB}_2 \quad (2)$$

Park und Martin nutzten die Lie-Theorie, um eine geschlossene, exakte Lösung und eine geschlossene Lösung für kleinste Fehlerquadrate unter der Annahme der Anwesenheit von Rauschen [3] abzuleiten. Eine Lösung mit kleinsten Fehlerquadraten in geschlossener Form ist praktischer, da \mathbf{A} und \mathbf{B} oft verrauschte Daten enthalten. Sie sind abhängig vom Messsystem und von der kinematischen Kette des Roboters. Beide Systeme haben ihre Genauigkeitsgrenzen. Ein praktischer Ansatz ist die Durchführung mehrerer Messungen nach n Bewegungen. Es wird ein System von n Gleichungen abgeleitet:

$$\mathbf{A}_1\mathbf{X} = \mathbf{XB}_1; \mathbf{A}_2\mathbf{X} = \mathbf{XB}_2; \dots; \mathbf{A}_n\mathbf{X} = \mathbf{XB}_n \quad (3)$$

Shah et al. geben einen Überblick über verschiedene Methoden zum Lösen des Systems $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ [4]. Die Lösungen werden dann in Gruppen eingeteilt: trennbare geschlossene Lösungen, simultane geschlossene Lösungen und iterative Lösungen. Eine trennbare geschlossene Lösung bedeutet, dass die Orientierungsparameter der Matrix \mathbf{X} getrennt von den Positionsparametern gelöst werden. Chou und Kamel lösen das Kalibrierungsproblem durch Einführung der Quaternionen [5].

Das Messen der 6D-Position eines Referenz- oder Kalibrierungsziels unter Verwendung eines Laserlini-

ensensors, der am Flansch eines Roboters montiert ist, ist eine komplexere Aufgabe, da der Laserliniensensor lediglich 2D-Messdaten (x und z) liefert. Müller et al. präsentieren eine Methodik zur Messung der 6D-Position eines Würfels, welcher gleichzeitig als Kalibrierobjekt verwendet wird [6]. Aufgrund von Ungenauigkeiten, wie beispielsweise Fertigungstoleranzen des Würfels, Ungenauigkeit der kinematischen Kette des Roboters und dem Rauschen während der Messungen des Würfels mit dem Laserliniensensor, ist für eine genaue Lösung eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate erforderlich. Dadurch wird eine Lösung mit minimalem Fehler in der Kalibrierungsmatrix des Sensors ermittelt. Während mehrerer Bewegungen des Roboters werden mehrere Messungen aus verschiedenen Sensorposen (mindestens drei Posen) gesammelt. Das Verfahren ist vergleichbar mit der Kalibrierung der Position des TCP eines Roboterwerkzeugs, bei der dieser mehrmals mit unterschiedlicher Ausrichtung in vordefinierte Positionen ausgerichtet wird. Um die Position und Orientierung des Sensors zu kalibrieren, wird ein definiertes Feature, die Kante des Kalibrierobjektes, aus verschiedenen Posen gemessen. Ein Satz von n Messungen wird gesammelt. Das Problem wird wieder in ein Orientierungs- und Translationsproblem aufgeteilt.

- Orientierungsproblem

$$\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_X = \mathbf{R}_X \cdot \mathbf{R}_B \quad (4)$$

- Translationsproblem

$$\mathbf{R}_A \cdot \underline{r}_X + \underline{r}_A = \mathbf{R}_X \cdot \underline{r}_B + \underline{r}_X \quad (5)$$

Die oben genannten Probleme werden separat gelöst. Die Orientierungskomponente wird zuerst gelöst, um \mathbf{R}_X zu finden. Letzteres wird dann in Gleichung (5) eingesetzt, um \underline{r}_X zu ermitteln.

3 Anwendungsbeispiel des Sensors in der Automobilebranche

Das ZeMA entwickelt einen Versuchswickler (siehe Abbildung 2) zur Realisierung sensitiven Wickelns endloser Gummiprofile. Serielle Kinematiken sind oft die zentrale Komponente in einer automatisierten Wickelanwendung [7]. Die Grundkomponenten des Versuchswicklers sind ein sensitiver Roboter, ein Wickelwerkzeug, ein Laserliniensensor und ein Wickelzylinder. Die Entwicklung des Wickelwerkzeugs und die Umsetzung des sensitiven Wickelprozesses werden in zukünftigen Arbeiten diskutiert.

Eine Grundaufgabe des Laserliniensensors ist das Vermessen der Wickelzylinder bezogen auf das Roboter-Basiskoordinatensystem. Die Geometrie des Wickelwerkzeugs und die hohe Genauigkeitsanforderung im Wickelprozess lassen das Vermessen des Wickelzylinders durch Teach-In-Verfahren nicht zu. Deswegen ist dieses Problem durch berührungslose Sensoren, wie z. B. Kamera oder Laserliniensensor, zu lösen. Außerdem bieten berüh-

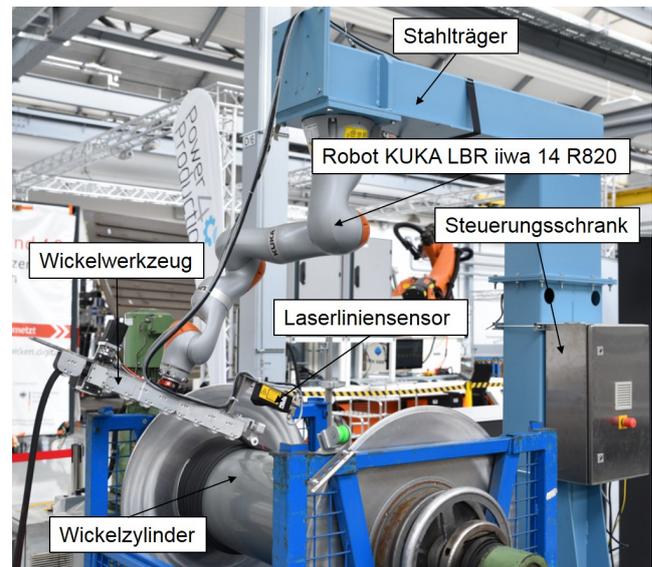


Abbildung 2 Aufbau des Wickeldemonstrators am ZeMA.

rungslose Sensoren gegenüber dem Teach-in-Verfahren schnellere Inbetriebnahmezeiten. Eine weitere Anforderung ist, dass das resultierende Wickelbild überwacht und bewertet werden muss. Lücken zwischen zwei gewickelten Profilen sowie die Überlagerung von zwei Profilen muss detektiert und lokalisiert werden. Kameras können für die Inspektion nicht eingesetzt werden, da der Kontrast zwischen den schwarzen Profilen zu gering ist.

Zur Validierung der Kalibrier- und Messmethode wurde eine Demonstrator mit einem Kuka Roboter (KUKA LBR iiwa 14 R820) [10] und einem Laserliniensensor aufgebaut. Das zuvermessende Betriebsmittel ist eine Wickelrolle auf die mehrere Lagen Gummi aufgewickelt werden sollen. Der Laserliniensensor wird im ersten Anwendungsfall zur Kalibrierung der zylindrischen Wickelrolle verwendet. Neben der Ermittlung der Seitenwände zur Begrenzung des Wickelarbeitsraumes wird auch der Umfang der Rolle sowie der Startpunkt ermittelt. Das Lagebild des gewickelten Gummis wird im zweiten Schritt durch den Linienlaser vermessen und ausgewertet.

Der Wickelzylinder ist zunächst grob zum Roboter positioniert. Im ersten Schritt wird dieser eingemessen. Ein Zylinder im Raum wird durch eine Länge und einen Kreis mathematisch definiert. Letzteres wird im 3D-Raum durch einen Mittelpunkt, einen Radius und einen Normalenvektor beschrieben. Der Kalibrierfehler des Sensors, Fertigungstoleranzen des Zylinders und die Roboter-Genauigkeit führen dazu, dass der Kreis überbestimmt interpoliert werden muss. Das bedeutet, zum Messen des Kreises sind mindestens vier Positionen erforderlich. Die Punkte werden vom Laserliniensensor gemessen. Wobei ${}^s\mathbf{T}_p$ die Transformation der gemessenen Position in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem und ${}^F\mathbf{T}_s = \mathbf{X}$ die Kalibrierungsmatrix des Sensors ist. Die 2D-Messdaten der Position werden in den 3D-Raum transformiert, indem

sT_p mit der Transformationsmatrix ${}^F T_s$ multipliziert wird. Während des Einmessprozesses wird der Roboter zur linken und rechten Seite des Zylinders bewegt. Der Linienlasersensor überwacht dabei dauerhaft die Oberfläche und sendet ein Signal an den Roboter, sobald eine Zylinderbegrenzungskante erkannt wird. Infolgedessen wird die Roboterbewegung gestoppt und die Kante wird vom Sensor an vier verschiedenen Stellungen vermessen. Die Begrenzungskante ist definiert als der Schnittpunkt der beiden Linien A und B (siehe Abbildung 4). Die Linien werden durch ein Best-Fit-Verfahren interpoliert. Der Kreis wird nach dem Sammeln der Messdaten der Kanten angepasst. Der Roboter bewegt sich dann in die entgegengesetzte Richtung und stoppt, sobald die zweite Kante erkannt wird. Im Anschluss wird die Gesamtlänge des Zylinders berechnet und als Parameter an die Robotersteuerung übergeben.

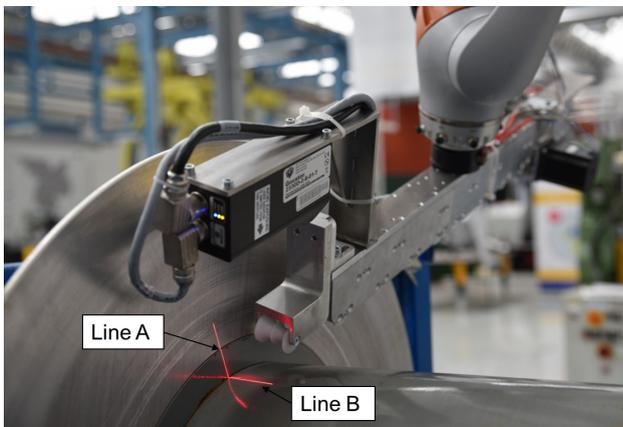


Abbildung 3 Vermessen der Kante des Wickelzylinders mit einem Laserliniensensor.

Anhand des Wickelbildes kann die Qualität des Wickelprozesses bewertet werden. Größere Spalten und Überlappungen sind zu vermeiden. Das Erfassen des Wickelbildes erfolgt mithilfe eines Laserliniensensors, sodass zu definierten Zeitpunkten 2D-Lasermesswerte aufgezeichnet werden.

Die translatorische Geschwindigkeit des Gummis wird basierend auf der Wickelgeschwindigkeit und dem Wickelradius ermittelt. Die Wickelgeschwindigkeit ist durch die Robotersteuerung abzufragen. Der Wickelradius wird aus dem kürzesten Abstand zwischen der Roboterpose und der Achse des vermessenen Wickelzylinders berechnet. Die bereits gewickelte Länge des Gummis zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen wird durch Multiplikation der translatorischen Geschwindigkeit mit der Zeitdifferenz der Messungen ermittelt. Dadurch können die 2D-Messwerte auf den 3D-Raum erweitert werden und das Wickelbild kann im 3D-Raum visualisiert und analysiert werden. Da im statischen Zustand, aufgrund des limitierten Messbereiches des Laserliniensensors, nur ein Ausschnitt des Gummiprofils erfasst werden kann, gilt es, die Messdaten entlang des Wickelzylinders aufzuzeichnen. Dazu werden die Daten während

der Wickelbewegung vom Sensor-Koordinatensystem in das Roboter-Basiskoordinatensystem transformiert. Grundvoraussetzung für die Datentransformation ist eine Vermessung des Sensors bezüglich des Roboter-Flansch-Koordinatensystems. Das gesamte Wickelbild ergibt sich aus der Überlappung der verschiedenen Wickelbereiche (siehe Abbildung 4).

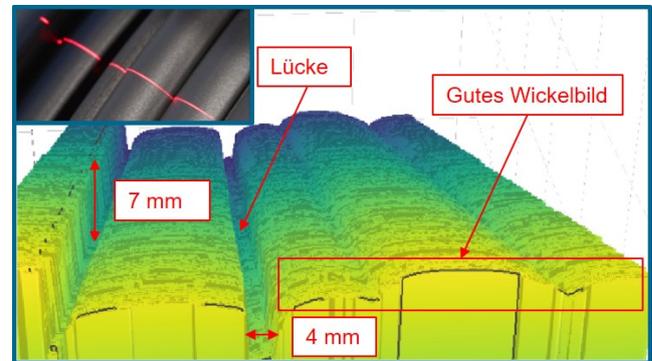


Abbildung 4 Ausschnitt einer Wickelbildmessreihe mithilfe des Laserliniensensors.

4 Anwendungsbeispiel für den Sensor in einem Nietprozess

Zur Validierung der Kalibriermethoden wurde der Laserliniensensor sowie die entwickelten Methoden in einen Nietprozess am ZeMA implementiert. Der Laserliniensensor wurde dazu am Flansch eines UR10 [11] Roboters montiert.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird das Flugzeug in mehrere Abschnitte unterteilt. Das Cockpit befindet sich in den ersten Sektionen, während die Sektionen 13-18 den Rumpf bilden, der den Passagierbereich darstellt. Der hintere Teil des Flugzeugs, Sektion 19, vervollständigt den Passagierbereich mit der Druckkalotte und der Sektionstonne. Wie in Abbildung 5 veranschaulicht und rot markiert, muss die Druckkalotte zur Sektionstonne 19 mittels Nietverbindungen gefügt werden. Die Nietpositionen sind in Abbildung 5 orange markiert. Zu den Vorarbeiten gehören das Vorbohren, Bohren, Senken, Demontieren und Auftragen von Dichtmitteln auf ca. 800 Nietpositionen. Um dem steigenden Kostendruck der Flugzeugmontage gerecht zu werden, bietet die Implementierung eines teilautomatisierten Prozesses, wie z. B. der Mensch-Roboter-Kollaboration, einen möglichen Lösungsansatz. Dafür wird der Roboter in der Sektion 19 auf einer Hubeinheit positioniert, um die Gegenhalteaufgabe auszuführen. Der Werker verbleibt auf der Außenseite der Sektion 19 auf der Druckkalotte, um die Niete zu setzen. Für einen erfolgreichen Nietvorgang ist eine genaue Positionierung und Ausrichtung des Ambosses in Bezug auf den Niet erforderlich. Der Niet oder die entsprechende Bohrung befindet sich in der Druckkalotte bzw. dem Ringspant der Sektionstonne. Die Sektionstonne wird nach der Eintaktung in die Station

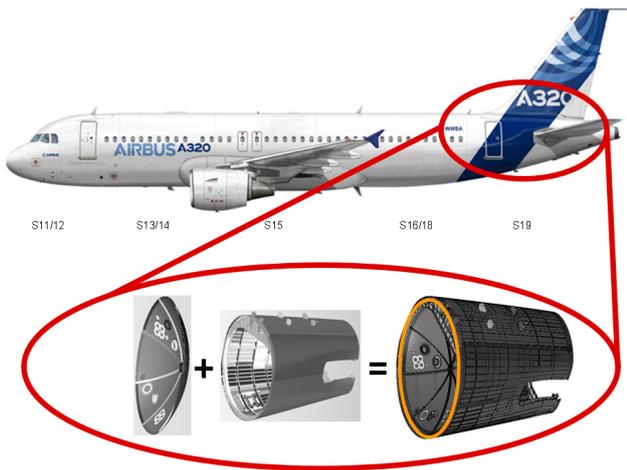


Abbildung 5 Struktur bzw. Sektionen des Flugzeugs Airbus A320 (oben) und die aufgetrennte Sektion 19, bestehend aus der Druckkalotte und der Sektionstonne. [12] [13] [14]

an bodennahen Befestigungsflaschen befestigt. Die Hubeinheit, die sich in der Mitte der Sektion befindet, hebt den Roboter in den Arbeitsraum nahe der Druckkalotte. Der Roboter positioniert dann den Amboss gegen den Niet. Durch die Arbeitsraumerweiterung des Roboters mittels der Hubeinheit können somit alle 800 Nietpunkte erreicht und bearbeitet werden. Geringe Abweichungen in der Positionierung der Sektionstonne, insbesondere bei Neigungen, führen aufgrund der großen Abmessungen (3m Bauteilhöhe und 3m Druckkalottendurchmesser) zu großen Positionsabweichungen der Nietlöcher in Bezug auf die berechnete Roboterposition. Darüber hinaus beeinflussen sowohl die Lageungenauigkeiten der Hubeinheit als auch des Roboters den Abstand zwischen Amboss und Niet.

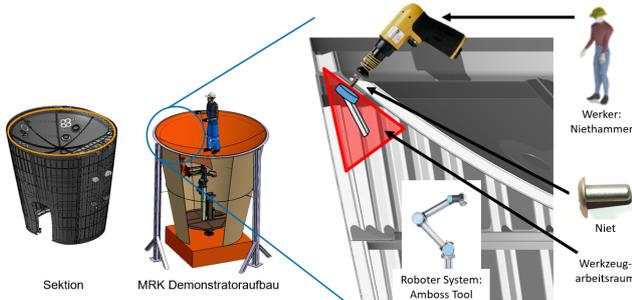


Abbildung 6 Der Forschungsansatz besteht darin, den Bediener mit einem kollaborativen Roboter im Inneren des Produkts zu unterstützen, um die Prozesszeit zu verkürzen und die Fertigungsqualität und die Arbeitsbedingungen zu verbessern. [13] [15]

Grundlegende Prämisse des Demonstrators ist daher, dass eine Umsetzung ohne jegliche Messtechnik aufgrund der großen Arbeitsfläche und der geringen Toleranzen nicht möglich ist. Daher ist eine Verkürzung der Toleranzkette durch zusätzliche Sensoren erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein Lasertriangulationssensor eingesetzt, um die Prozesskette zu verkürzen. Sowohl für die Referenzierung als auch für die Locherkennung innerhalb des Niet-

prozesses wird der Lasertriangulationssensor verwendet. Zu Beginn führt das Robotersystem in Verbindung mit dem Laserliniensensor einen automatisierten Scan des Bauteils durch, um die absolute Lochposition und -orientierung der 4 mm großen Nietlöcher zu identifizieren. Im Anschluss positioniert der Roboter den Amboss für den kollaborativen Nietprozess vor dem Nietloch. Das Sammeln von Daten während des Nietprozesses mithilfe des Kraftmomentensensors sowie ein nachgelagerter 3D-Scan mittels Laserliniensensor ermöglicht eine abschließende Aussage über die Qualität des Fügeprozesses. Im Vergleich zum Einsatz eines 2D-Kamerasystems, kann durch den Einsatz des 2D-Linienlasers, in Kombination mit einer Scanbewegung des Robotersystem, abschließend eine 3D-Punktwolke des verformten Nietkopfes erstellt, und so dessen Abmessungen entsprechend der Nietrichtlinien analysiert und bewertet werden.

Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen Nietprozess ist eine genaue Positionierung des Ambosses vor dem Nietschaft. Diesbezüglich müssen die Transformationsbeziehungen zwischen der Roboterstruktur sowie den eingebundenen prozessspezifischen Werkzeugen, wie in Abbildung 7 dargestellt, ermittelt werden. Um die Positionen der Nietbohrungen zu bestimmen, führt der Roboter zunächst den zuvor erwähnten Laserscan mit dem Lasertriangulationssensor durch, und bestimmt so die absolute Position und Orientierung der Löcher. Mit der Gleichung der nachfolgenden Transformation werden die Nietlöcher in Roboter-Basiskoordinaten ausgedrückt:

$${}^B\mathbf{T}_H = {}^B\mathbf{T}_{F_1} \cdot {}^{F_1}\mathbf{T}_S \cdot {}^S\mathbf{T}_H$$

Im Nietprozess übernimmt das Robotersystem die Gegenhaltefunktion, indem der Amboss vor dem Nietloch positioniert wird. Unter der Annahme, dass das zuvor gemessene Nietloch der neuen Pose des Ambosses entspricht, kann die anzufahrende Pose des Roboters ${}^B\mathbf{T}_{F_2}$, wie in der nachfolgenden Gleichung dargestellt, bestimmt werden.

$${}^B\mathbf{T}_{Anvil} = {}^B\mathbf{T}_{F_2} \cdot {}^{F_2}\mathbf{T}_{Anvil} \stackrel{!}{=} {}^B\mathbf{T}_H$$

$${}^B\mathbf{T}_{F_2} = {}^B\mathbf{T}_H \cdot ({}^F\mathbf{T}_{Anvil})^{-1}$$

5 Zusammenfassung

Der Laserliniensensor wurde an verschiedenen Robotersystemen montiert und kalibriert. Das entwickelte Vermessungskonzept wurde anhand der oben gezeigten Anwendungsszenarien validiert und ist auf weitere Aufgabenfelder adaptierbar. Eine Verbesserung der Genauigkeit der Sensorkalibrierung kann durch eine Verbesserung der Genauigkeit des Würfels und der Genauigkeit der kinematischen Ketten des Roboters erreicht werden [9]. Dies ist durch die Identifizierung der kinematischen Parameter des Roboters möglich [17]. Es werden mehr Messdaten gesammelt, indem der Roboter mehr als dreimal bewegt wird, um die Konvergenzpunkte des Verfahrens, basierend auf der Verarbeitung der Statistikdaten, zu lokalisieren. Dadurch kann die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert werden, sodass sie näher an der Wiederholgenauigkeit des Roboters liegt.

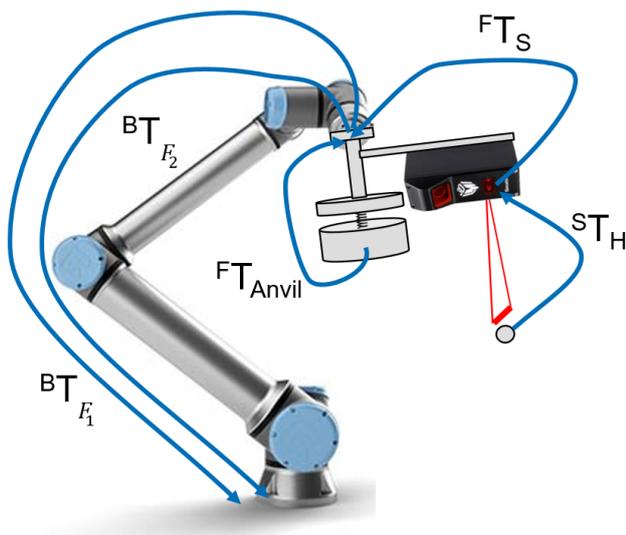


Abbildung 7 Die ermittelten Transformationsbeziehungen zwischen Nietloch, Sensor, Roboterbasis und Amboss sind Voraussetzung für die präzise Positionierung des Prozesswerkzeugs vor dem Nietloch. [16]

Die entwickelte Kalibrieremethode kann an die Kalibrierung einer 2D-Kamera adaptiert werden. Als Kalibrieretarget wird hier ein Schachbrettmuster eingesetzt. Dadurch ist eine einfache Rekonfiguration und Inbetriebnahme von Sensoren und Werkzeugen am Roboterflansch zu erreichen. Referenzierungen, Inspektionen oder Vermessungsaufgaben sind mithilfe der erstellten Tools einfach lösbar und erweiterbar.

6 Literatur

- [1] DIN EN ISO 8373: *Industrieroboter - Wörterbuch*.
- [2] Shiu, Y. C.; Ahmad S.: *Calibration of Wrist-Mounted Robotic Sensors by Solving Homogeneous Transform Equations of the Form $AX=XB$* . IEEE Transactions on Robotics and Automation. Februar 1989, Vol. 5, No. 1.
- [3] Park, F. C.; Martin B. J.: *Robot Sensor Calibration: Solving $AX=XB$ on the Euclidean Group*. IEEE Transactions on Robotics and Automation. October 1994, Vol. 10, No. 5.
- [4] Shah, M., Eastman, R. D., Hong, T.: An Overview of Robot-Sensor Calibration Methods for Evaluation of Perception Systems. Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, PERMIS'12, ACM, 2012, pp. 15-20.
- [5] Chou, J. C. K., Kamel, M.: Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions. In: The International Journal of Robotics Research, 10(3): 240-254, 1991.
- [6] Müller, R., Vette-Steinkamp, M., Masiak, T., Kanso, A.: *Position and Orientation Calibration of a 2D Laser Line Sensor using Closed-form least-squares solution*. Saarbrücken, (2018).
- [7] Feldmann, K., Schöppner, V., Spur G.: *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. ISBN:978-3-446-42827-0.
- [8] Reitter, E.: *Premium AEROTEC opens plant in Romania and continues growth*. Augsburg. 12.07.2011, last checked on 27.05.2015, www.premium-aerotec.com.
- [9] Airbus Group: *Global presence - Airbus Group in China*. (2015), last checked on 27.05.2015, www.airbusgroup.com/int/en/group-vision/global-presence/china.html.
- [10] KUKA AG: Augsburg, www.kuka.com.
- [11] Universal Robots A/S: Odense, Dänemark, www.universal-robots.com.
- [12] AIRBUS S.A.S.: Toulouse, www.airbus.com.
- [13] Premium Aerotec GmbH: Augsburg, www.premium-aerotec.com.
- [14] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T.: *Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process*. SAE Technical Paper. (2017), doi: doi.org/10.4271/2017-01-2096.
- [15] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: *Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly*. Journal of Robotics and Automation. (2018), <https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf>.
- [16] Müller, R., Vette, M., Schirmer, L. and Masiak, T.: *Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process*. SAE Technical Paper. (2019).
- [17] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Masiak, T., Kanso, A.: *Methodology for design of mechatronics based on suitability for modern application scenarios*. In: Conf. International Federation of Automation Control Papers On Line 50(1):12727-12733, Oct., 2017.