Montage am kontinuierlich bewegten Band

Sensorkonfiguration und Programmierung

F. Lange, **B. Willberg**, **P. Meusel**, **J. Langwald**, **S. Jörg**,
M. Frommberger, **G. Hirzinger**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Weßling

J. Werner
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München, Augsburg

Kurzfassung

Durch Industrieroboter ausgeführte Montageaufgaben im Bereich von Förderbändern erfordern die laufende Erfassung der Lage und der Bewegung des Basisbauteils. Dazu werden sowohl berührungslos messende als auch nachgiebige Sensoren für den Kontaktfall benötigt. Für große Kräfte oder Momente erfordert dies einen besonderen Aufbau. Die Programmierung erfolgt am stehenden Band. Dabei werden automatisch Objekte definiert, deren Relativlage zum Roboter bei der späteren Programmausführung durch die Sensorik geregelt werden soll.

1. Einleitung

Montageaufgaben durch Industrieroboter werden normalerweise im Stillstand ausgeführt. Das bedeutet beim Arbeiten an einem Förderband, dass das transportierte Basisbauteil vor dem Montageplatz aus dem Fließbetrieb ausgetaktet und später wieder eingetaktet werden muss. Eine förderbandsynchrone Automatisierung kombiniert die hohe und reproduzierbare Qualität der automatisierten Montage mit der Flexibilität und dem Platzbedarf der manuellen Fließmontage [1],[2].

Die Realisierung einer automatisierten Montage an einem kontinuierlich bewegten Objekt erfordert:

- die Erfassung der Geschwindigkeit und der Lage des Basisbauteils beim Teach-In von Punkten,
- den Ausgleich von durch die Regelung entstehenden Zeitversätzen, welche eine bleibende Regelabweichung bewirken können und
- die Vorhersage der Pose des Basisbauteils, welche aufgrund von Störgrößen in allen 6 Freiheitsgraden von der Soll-Pose abweicht [3].

Ein robuster Montagevorgang benötigt daher sowohl die Erfassung der Bewegung des von der Fördereinrichtung bewegten Basisbauteils als auch die des vom Roboter geführten An-

bauteils. Während letztere durch die roboterinterne Positionserfassung üblicher Industrieroboter mit ausreichender Genauigkeit erfolgt, ist für die Verfolgung des Basisbauteils zusätzliche Sensorik erforderlich.

Die meisten Robotersteuerungen bieten Funktionalitäten zur synchronen Bewegung mit einer Fördereinrichtung an (conveyor tracking). Diese Verfahren erlauben jedoch nur eine Nachführung in Förderrichtung (siehe z. B. [5]). Weitere unsichere Lagefreiheitsgrade des Basisbauteils werden nicht erfasst. Außerdem ist die Bestimmung der Lage relativ ungenau, da die Messung an der Fördereinrichtung und nicht am gewünschten Kontaktpunkt erfolgt. Somit können Schwingungen innerhalb des Basisbauteils oder Kalibrierungsfehler durch Unsicherheiten in der Befestigung des Basisbauteils nicht ausgeglichen werden [3].

Beispiele von Montageaufgaben, für deren Bearbeitung während der Bewegung Bedarf besteht, gibt es insbesondere im Bereich der Automobil-Endmontage, z. B. beim Anbau von Rädern, von großen Komponenten wie dem Cockpit, der Frontpartie oder einem Schiebedach oder von schweren Teilen wie Scheiben oder Türen.

Zur Montage während der Förderbewegung wird der Roboter auf einer parallel zum Förderband aufgebauten Linearachse geführt (siehe Bild 1). Dies ist wichtig für Aufgaben, bei denen der Roboter senkrecht zur Förderrichtung ausgerichtet sein muss, wie z. B. beim Einbau eines Cockpits in eine Fahrzeugkarosse. In anderen Fällen, bei denen der Roboterarm auch schräg zum Band montieren darf, kann bei ansonsten gleichem Verfahren auf die Linearachse verzichtet werden.

2. Sensorkonfiguration

Die Aufgabe umfasst sowohl das Greifen von Anbauteil und Befestigungselementen (z. B. Schrauben) als auch die eigentliche Montage. Diese beinhaltet die Erfassung des Basisbauteils im Fördersystem bei Eintritt in die Anlage und die Grobverfolgung seiner Position, die berührungslose Detektion der Posedifferenzen von Montagehauptkörper und Roboter und die taktile Messung von Posedifferenzen während des mechanischen Kontaktes. Während für die Montage in jedem Fall Sensorik erforderlich ist, kommt es bei der Aufnahme auf die Zuführung an. Im Beispiel nach Bild 1 erfolgt die Schraubenaufnahme durch Anfahren von fest programmierten Roboterstellungen. Bei der Radzuführung (hinten in Bild 1, links neben dem Roboter) ist die Position des Rades (abgesehen von geringen Abweichungen durch unterschiedliche Radgrößen) definiert, die Orientierung ist jedoch unbekannt und muss daher auch durch Sensorik erfasst werden.

Bild 1: links: Gesamtansicht mit einem auf einer Linearachse montierten KUKA-Roboter und einer durch eine Elektrohängebahn transportierten Karosse;
rechts: Detailansicht des Endeffektors mit nachgiebigem Kraft-Momentensensor

Grundsätzlich werden zur Ermittlung der Lage von Anbauteil oder Basisbauteil unabhängig von der jeweiligen Montageaufgabe unterschiedliche Sensoren benötigt. Dabei gibt es folgende Prozessphasen [1]:

- Vorbereitung: Zunächst erfolgt die Aufnahme von Anbauteil und evt. Hilfsgütern. Dies ist aufgabenabhängig und wird deshalb hier nicht weiter verfolgt. Oft lässt sich einer der im Folgenden beschriebenen Sensoren auch hierfür nutzen.
- Grobpositionierungsphase: Diese Phase wird benötigt, um einen Startpunkt für die folgende Feinpositionierung zu erreichen.
- Annäherungsphase: Die Regelung der Annäherung erfolgt mittels berührungsloser Sensorik wie beispielsweise einer Kamera mit dazugehöriger Bildverarbeitung.
- Kontaktphase: Der Montageprozess ist durch den mechanischen Kontakt zwischen Montagehauptkörper und Robotersystem gekennzeichnet.

2.1 Sensoren zur groben Lageerfassung

Zur groben Lageinformation sind Sensoren erforderlich, die erfassen, wann ein Basisbauteil den Montagebereich erreicht hat und eine genauere Lagebestimmung durch andere Sensoren möglich ist. Dazu können die zum Conveyor Tracking vorgesehenen Sensoren eingesetzt werden, wie ein Encoder an der Fördereinrichtung für den Aufbau nach Bild 1. Die Genauigkeit dieser Systeme ist durch ggf. auftretende Schwingungen begrenzt, da die Messung an der Laufkatze der Elektrohängebahn erfolgt. Dies ist kein Problem, wenn während der Annäherungsphase andere Sensoren die Lageerfassung übernehmen können.

Alternativ wäre ein Laser-Abstandsmesser, eine Lichtschranke o. ä. möglich, also Sensoren, die nur einmal existieren und nicht an jeder Elektrohängebahn montiert sind. Prinzipiell reicht die Erfassung der Förderkomponente.

2.2 Berührungslos messende Sensoren

Während der Annäherungsphase des Anbauteils an das Basisbauteil erfolgt die Lagebestimmung berührungslos, z. B. durch ein Bildverarbeitungssystem oder einen Laser-Scanner. Besonders vorteilhaft ist eine vom Roboter geführte Kamera, da in dem Fall bei vielen Aufgaben eine verdeckungsfreie Anordnung in der Nähe des bewegten Montageortes gewählt werden kann. Für die Montage nach Bild 1 bietet sich eine Kamera an, die durch das in jeder Felge vorhandene Achsloch auf die Radnabe blickt (Bild 2). Diese Anordnung erlaubt auch die Ermittlung der Orientierung des Rades bei der Aufnahme. [6] beschreibt die Anordnung der Kamera und die Bildverarbeitung im Detail.

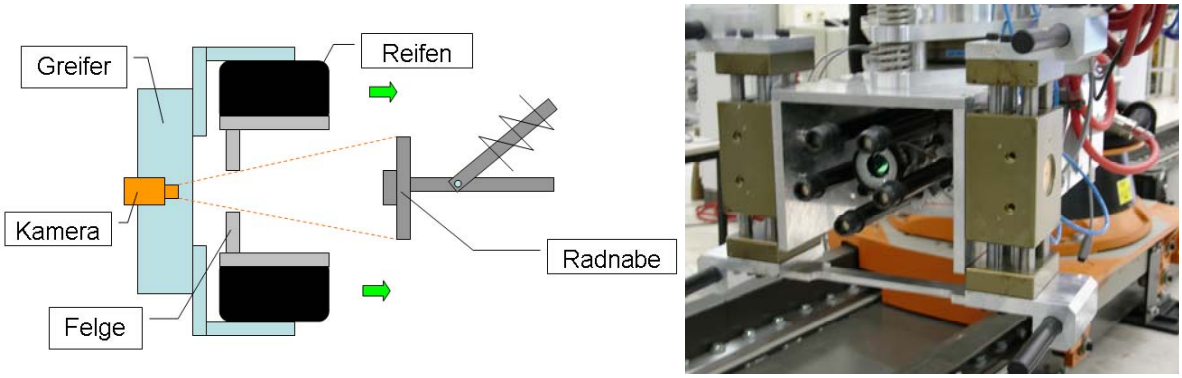

Bild 2: Skizze der Anordnung mit durch das Achsloch blickender Kamera und Bild des Endeffektors mit zwischen den Schraubspindeln angeordneter Kamera mit Ringlampe

2.3 Nachgiebige taktile Sensorik

In der Kontaktphase ist sowohl eine passive Nachgiebigkeit als auch Sensorik nötig. Eine zwischen Roboterflansch und Werkzeug eingebaute Nachgiebigkeit mildert einen durch Mess-Ungenauigkeiten oder Regelfehler verursachten ruckartigen Kontakt und gleicht hochfrequente Störungen der Fördereinrichtung aus. Dies kommt insbesondere dann vor, wenn mehrere Roboter am selben Fahrzeug gleichzeitig montieren. Zusätzlich ist die Messung der Kontaktkräfte und -momente nötig, um die Auslenkung der Nachgiebigkeit durch Nachführung des Roboters zu begrenzen [1].

Nachteilig bei nachgiebigen Anordnungen ist die Neigung zu Schwingungen, die durch Beschleunigungen des Roboters leicht angeregt werden. Dies kann jedoch regelungstechnisch beherrscht werden [7]. Dagegen führen steife Sensoren bei träger Dynamik des Roboters zu hohen Kontaktkräften.

Da nachgiebige Sensoren nur für kleine Kräfte und Momente kommerziell verfügbar sind, wurde eine skalierbare Anordnung konstruiert (Bild 3), die bei Verwendung eines verfügbaren Sensors [8] als Messzelle durch außen angebrachte zusätzliche Federelemente je nach Steifigkeit und Abstand auch für große Kräfte und Momente ausgelegt werden kann. Dies ist

erforderlich, da das Werkzeug neben dem Greifer für das Anbauteil auch noch die Befestigungswerkzeuge enthält und daher meist recht schwer ist (etwa 120 kg bei der Anordnung nach Bild 1).

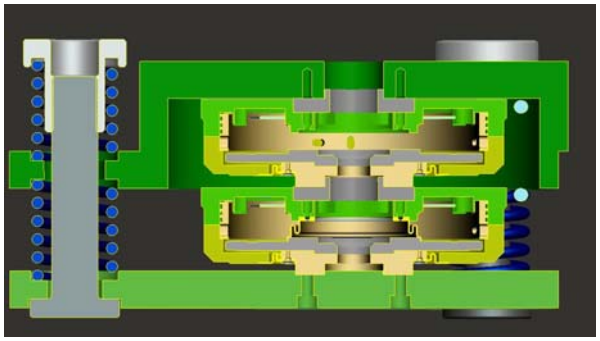

Bild 3: Foto und Skizze des Kraft- Momentensensors für große Kräfte und Momente (Exo-Compliance)

Die Konstruktion beinhaltet außerdem

- Anschläge, um einer Zerstörung der Messzelle vorzubeugen,
- eine einstellbare Vorspannung zum Ausgleich von Gravitationskräften,
- Elastomer-Elemente (innerhalb der Messzelle) zur Dämpfung der Schwingung des Endeffektors,
- eine doppelte Messzelle zur Verdopplung des Messbereichs auf +/- 2 mm bzw. +/- 2 °,

Bei nachgiebigen Sensoren werden zunächst die translatorischen und rotatorischen Auslenkungen der Abtriebsseite gemessen. Normalerweise werden daraus die angreifenden Kräfte und Momente berechnet. Stattdessen wird hier direkt die Auslenkung als Messwert herausgeführt. Die Regeldifferenz wird somit, wie bei der berührungslos messenden Sensorik, durch Positionsdifferenzen und Rotationen repräsentiert. Dies bringt Vorteile bei der Nachführung von Robotern mit der (üblichen) Positionsschnittstelle. Außerdem ist keine Kalibrierung für die Kräfte und Momente erforderlich, wodurch nichtlineare Federn oder Dämpfer verwendbar sind.

2.4 Sensorfusion

Zunächst erscheint es ausreichend, in jeder Montagephase nur einen Typ von Sensoren auszulesen. Durch Fusion aller jeweils verfügbaren Daten ergeben sich jedoch Vorteile, z. B. wenn während der Annäherungsphase ein Band-Stopp erfolgt, den das Messsystem an der Fördereinrichtung sofort erfasst, während die Bildverarbeitung ihn erst nach einer rechenzeitbedingten Verzögerung detektiert. Ein anderes Beispiel ist der Übergang zum Kontakt,

bei dem durch den taktilen Sensor zunächst nur die Normalkraft sensiert wird, während die Führung zu gering für die übrigen Komponenten ist. Schließlich kann der Encoder auch noch genutzt werden, um eine Kollision zu verhindern, wenn nach der Montage während der Rückzugsbewegung noch Störungen oder ein Band-Stopp auftreten, da ansonsten die Bildverarbeitung auch für die Vermessung der angeschraubten Räder programmiert sein müsste.

3. Programmierung der Montageaufgabe

Die Programmierung von Montageaufgaben an bewegte Objekte unter Verwendung der vorgestellten Anordnung unterscheidet sich von anderen Roboterprogrammen. Anders ist zunächst das Teach-In von Punkten. Dabei muss nicht nur ein Punkt manuell angefahren und aufgezeichnet werden, sondern es muss zu diesem Punkt auch die Auslenkung des Sensors sowie die Position der Fördereinrichtung festgehalten werden. Erst dies erlaubt später die Berechnung eines Punktes der Referenztrajektorie.

Für die Programmierung hat es sich als praktisch erwiesen, wenn sie zunächst am still stehenden Band erfolgt. Die Förderbewegung wird dann nach dem Teach-In ergänzt.

Dies erfordert die Programmierung einer Ablaufsteuerung, in der z. B. definiert ist, welche Teile der Bahn am bewegten Objekt erfolgen und welche die ortsinvariante Aufnahme von Teilen betreffen. Außerdem beschreibt die Ablaufsteuerung, welche Lagekomponenten sensorgestützt korrigiert werden dürfen, sowie grundsätzlich wann welche Sensoren aktiv sind und in welcher Betriebsart. Dazu sind auch Parameter vorgebbar. Die Ablaufsteuerung wird im zum Teach-In verwendeten Roboterprogramm durch Setzen von fiktiven Ausgängen eingegeben, die nachher bei der endgültigen Programmerstellung entsprechend ausgewertet werden. Letztere erfolgt dann automatisch nach Vorgabe von globalen Parametern wie der Bandgeschwindigkeit.

Ein typischer Parameter ist ein Sensorsollwert, der jedoch zeitvariant und für jeden Sensor unterschiedlich sein kann. Daher ist seine direkte Vorgabe nicht realistisch. Stattdessen wird im Folgenden eine Methode beschrieben, diese Werte automatisch zu generieren.

Zunächst werden Objekte mit bestimmten Eigenschaften definiert. Sie sind z. B. fix oder bewegt. Aus dieser Eigenschaft wird später entschieden, ob die Förderbewegung bei der Arbeit an diesem Objekt addiert wird oder nicht. Solange ein Objekt als neu gekennzeichnet ist, darf der Roboter sich allmählich nähern. Wenn die Eigenschaft „neu“ gelöscht ist, muss der Sollabstand erreicht sein. Dann erfolgt ein Tracking unter schnellstmöglichem Ausgleich von

Regeldifferenzen. Zur Vermeidung von Sprüngen ist dies bei neuen Objekten nicht der Fall. Jedes Objekt ist also neu, bis seine Lage durch die Sensorik bestimmt wurde und genügend Zeit zur Sensorkorrektur verstrichen ist.

Jedes Objekt hat eine nominelle Lage, die bei bewegten Objekten zeitvariant ist. Für jeden Zeitpunkt ergibt sich aus der Differenz der nominellen Objektlage $\mathbf{T}_n$ und der programmierten Roboterlage (Referenzbahn) $\mathbf{T}_r$ der Sollabstand, bzw. die Transformation vom gewünschten Tool-Center-Point (TCP) $\mathbf{T}_d$ zum realen Objektsystem $\mathbf{T}_o$. Durch die durch die Sensoren real gemessene Objektlage kann damit die gewünschte Roboterlage ermittelt werden, bei der die Transformation zum sensierten Objekt gleich der gewünschten Transformation ist.

$$ {}^{d}\mathbf{T}_o = {}^{r}\mathbf{T}_n \tag{1} $$

Das ergibt für die Solllage $\mathbf{T}_d$ des TCP

$$ \mathbf{T}_d = \mathbf{T}_o \, {}^{o}\mathbf{T}_d = \mathbf{T}_o \, {}^{n}\mathbf{T}_r = \mathbf{T}_t \, {}^{t}\mathbf{T}_c \, {}^{c}\mathbf{T}_o \quad \mathbf{T}_n^{-1} \cdot \mathbf{T}_r \tag{2} $$

Dabei ist $\mathbf{T}_t$ die reale Lage, die aus den Achswerten des Roboters bestimmt wird. ${}^{t}\mathbf{T}_c$ ist die Lage der Kamera (oder eines anderen Sensors) im TCP-System und ${}^{c}\mathbf{T}_o$ ist die im Sensorsystem bestimmte Objektlage.

Nach (2) werden zur Bestimmung der Sollbewegung also neben den aktuell gemessenen Istlagen $\mathbf{T}_t$ und Sensorwerten ${}^{c}\mathbf{T}_o$ und konstanten Transformationen auch die Refereztrajektorie $\mathbf{T}_r$ des Roboters und die nominelle Objekttrajektorie $\mathbf{T}_n$ benötigt. $\mathbf{T}_r$ kann direkt aus dem Roboterprogramm extrahiert werden. $\mathbf{T}_n$ muss extra definiert werden, wobei dies durch eine heuristische Funktion automatisch aus der Referenztrajektorie erfolgt.

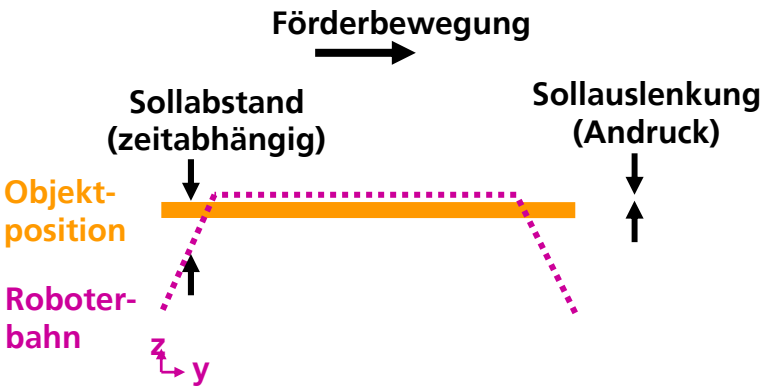

Bild 4: Modell zur Bestimmung der nominellen Objekttrajektorie

Dazu wird von einer Anordnung nach Bild 4 ausgegangen. Die Heuristik besteht darin, dass angenommen wird, dass der TCP sich dem Objekt in z-Richtung des TCP-Systems nähert. Weiterhin wird angenommen, dass das Objekt sich abgesehen von der Förderbewegung nicht bewegt. Somit ist der Punkt der Robotertrajektorie mit der größten z-Komponente (im TCP-System) gleichzeitig auch der Kontaktpunkt, der definitionsgemäß der Ursprung des Objektsystems ist. Die Objektorientierung ist gleich der TCP-Orientierung in diesem Punkt. Somit ergibt sich aus der gestrichelten Robotertrajektorie in Bild 4 die fett gezeichnete Objekttrajektorie durch Addition der Sollauslenkung. Implizit ergibt sich dadurch für jeden Zeitpunkt ein Sollabstand, der die Sollbewegung des Roboters durch (1) definiert. Sofern die z-Komponente des TCP-Systems nicht senkrecht zur Förderbewegung ist, muss die Objektlagebestimmung vor der Addition der Förderbewegung erfolgen.

Diese Art der Bestimmung der nominellen Objekttrajektorie ist nur offline nach dem Abfahren der programmierten Bahn (ohne Sensoren) oder zumindest stark vorausschauend möglich. Das endgültige Roboterprogramm enthält dann neben der Roboterbewegung und der Ablaufsteuerung auch die nominelle Objekttrajektorie. Die Definition des Objektes ist sensorunabhängig. Sofern ein Sensor (z. B. eine Kamera) nicht den Kontaktpunkt vermisst, ist eine weitere Transformation vom detektierten Merkmals-Punkt zum Kontaktpunkt erforderlich.

4. Regelung

Während der Ausführung des endgültigen Programms wird die Sensorkorrektur zu Beginn und nach der Bewegung an einem Objekt durch Rampen von der Istlage zur gewünschten Lage ersetzt, da die Sollbewegung sonst Sprünge aufweisen würde. Sofern das Basisbauteil außerhalb des Arbeitsbereiches des Roboters liegt, wird die Programmausführung angehalten. Beginn und Ende der Rampen bzw. der Wartezeit werden geglättet.

Bei Betrieb mit Linearachse wird die Roboterbasis zur Vereinfachung der Regelung möglichst gleichförmig bewegt. Die Sensorkorrektur bezieht sich damit auf die übrigen 6 Achsen. Lediglich bei stark verlangsamter Bewegung der Fördereinrichtung oder einem Band-Stopp wird die Linearachse angehalten. Die Montage kann dabei abgeschlossen werden.

Die Steuerung und Regelung des Roboters wird in [9] ausführlich beschrieben. Hier soll deshalb nur erwähnt werden, dass die Solltrajektorie durch die aktuelle Bandgeschwindigkeit über etwa 0,5 s vorhergesagt wird. Durch prädiktive Regelung wird der Roboter dann so vorgesteuert, dass der TCP genau die vorhergesagte Bahn abfährt. Dabei werden die jeweils zukünftigen Sollpositionen verwendet, um die Trägheit des Systems auszugleichen [10].

Prädiktionsfehler sollten den Nachgiebigkeitsbereich des Kraft-Momentensensors nicht überschreiten.

5. Ergebnisse

Realisiert wurde der Anbau von Rädern an eine durch eine Elektrohängebahn mit nominell 100 mm/s transportierte Karosse (Bild 1). Dabei umfasst die Aufgabe sowohl die Aufnahme von Schrauben und Rädern als auch das Fügen des Rades an die Radnabe und die Verschraubung. Die Kontaktkräfte und –momente bleiben während der gesamten Ausführung gering. Die durch sie bedingten Auslenkungen des Sensors liegen weit unterhalb der Grenzen von 2 mm bzw. 2 °. Bild 5 zeigt die Regeldifferenzen bei der Montage eines Rades. In den ersten 5 Sekunden von Bild 5 erfolgt die Annäherung und Ausrichtung rein bildgestützt. Dabei gibt es einen leichten Schleppfehler in Förderrichtung (y) und in Annäherungsrichtung (z). Danach stößt die Felge zweimal leicht an, bevor die Ziellage nach etwa 9 Sekunden erreicht wird. Dann wird die Auslenkung des Kraftsensors ausgeglichen, während gleichzeitig das Verschrauben des Rades erfolgt. Während dieser Phase ist das Rad bereits bezüglich der Radnabe unbewegt. Die durch die Toleranz zwischen Nabe und Felge geforderte Genauigkeit der Bewegung des Rades von etwa 0,1 mm wird somit gewährleistet.

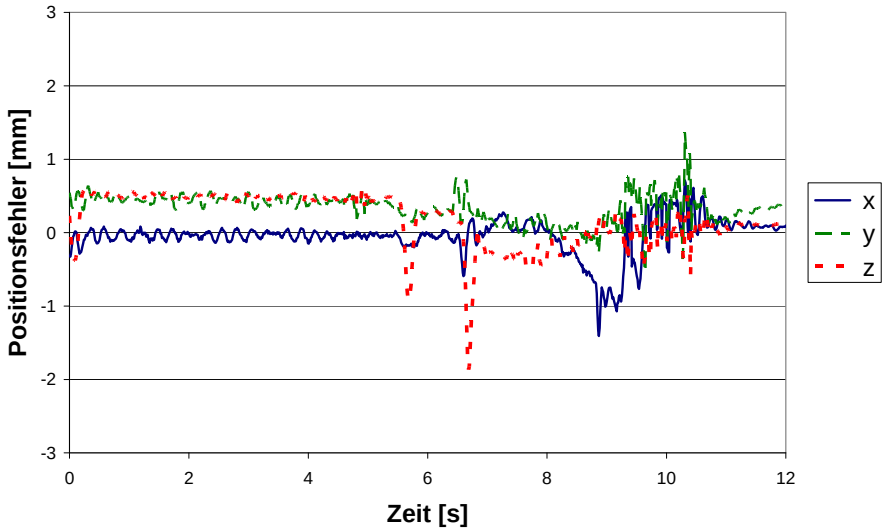

Bild 5: Regeldifferenzen während der Annäherungs- und der Kontaktphase an der Radnabe

6. Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt, dass durch Fusion von unterschiedlicher Sensorik eine zuverlässige und robuste Montage auch bei bewegten Objekten möglich ist. Die gezeigte Realisierung einer Radmontage an bewegte Fahrzeuge ist beispielhaft für solche Montagevorgänge. Daher können die gemachten Aussagen auch auf andere Aufgaben übertragen werden.

Alle Sensordaten werden so transformiert, dass sie die Lagedifferenz zwischen dem Basisbauteil und dem TCP darstellen. Nach der Programmierungsphase wird der Roboter dann derart geregelt, dass vorher berechnete nominelle Sensordaten erreicht werden. Dazu wird aus der aktuellen Roboterstellung und den Sensordaten die aktuelle Lage des Basisbauteils berechnet, durch die dann in Abhängigkeit des vorgegebenen Abstands zwischen Basis- und Anbauteil die Sollposition für den TCP berechnet wird.

7. Danksagung

Die Arbeit wurde in einen Projekt zur Montage in Bewegung (MiB) von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert Die Autoren möchten hiermit allen am Projekt Beteiligten für ihre Unterstützung danken.

8. Literaturangaben

[1] Reinhart, G.; Werner, J.: Flexible Automation for the Assembly in Motion. Annals of the CIRP, 2007. 56(1): p. 25-28.

[2] Zäh, M.F.; Werner, J.; Lange, F.: System to realize a conveying belt synchronous assembly, in 17th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus in Mechatronics and Robotics". 2006: Wien. p. 449-450.

[3] Zäh, M. F., Werner, J.; Tekouo, W.: Montage in Bewegung – die Automatisierung der Fließmontage, werkstatttechnik wt-online 97 (2007) 9, Seite 620-624.

[4] Jörg, S.; Langwald, J.; Stelter, J.; Natale, C.; Hirzinger, G.: Flexible Robot-Assembly using a Multi-Sensory Approach, Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 3687-3694, San Francisco, CA, 2000.

[5] KUKA.ConveyorTech 3.1, Softwarebeschreibung, KUKA Roboter GmbH, Augsburg 2004

[6] Lange, F.; Strobl, K. H.; Langwald, J.; Jörg, S.; Hirzinger, G.; Gruber, B.; Klein, J.; Werner, J.: Kameragestützte Montage von Rädern an kontinuierlich bewegte Fahrzeuge, Fachtagung ROBOTIK 2008, München, Juni 2008.

[7] Kamel, A.; Lange, F.; Hirzinger, G.: New Aspects of Input Shaping Control to Damp Oscillations of a Compliant Force Sensor, Proc. Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, California, May 2008.

[8] SCHUNK – Spannsysteme, Roboter Greifer, Linearsysteme, Automation, Spanntechnik: FTC, www.schunk.de/FTC, Schunk GmbH & Co KG, Lauffen 2008.

[9] Lange, F.; Kamel, A.; Hirzinger, G., Werner, J.: Sensorfusion und Regelung eines Roboters am kontinuierlich bewegten Band. Fachtagung Automation 2008, Baden-Baden, Juni 2008.

[10] Lange, F.; Hirzinger, G.: Learning of a Controller for Non-Recurring Fast Movements. Advanced Robotics, 1996