

Kameragestützte Montage von Rädern an kontinuierlich bewegte Fahrzeuge

F. Lange, K. H. Strobl, J. Langwald, S. Jörg, G. Hirzinger
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Weßling

B. Gruber, J. Klein
QUISS Qualitäts- Inspektionssysteme und Service GmbH, Puchheim

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

Kurzfassung

Betrachtet wird die Montage von Rädern an ein durch ein Förderband transportiertes Fahrzeug. Dazu nimmt ein Industrieroboter Rad und Schrauben auf und führt sie zum Fügen an das Fahrzeug, dessen Radnabe während der Bewegung in allen 6 Freiheitsgraden durch eine robotergeführte Kamera vermessen wird. Die Kamera ist mit einer Ringleuchte ausgestattet und hinter dem Achsloch des gehaltenen Rades angeordnet, das dadurch auch bei schwingender Karosse robust an die Radnabe herangeführt und kraftgeregelt verschraubt wird.

1. Einleitung

Eine robuste Montage von Rädern an ein durch ein Fördersystem bewegtes Fahrzeug ist durch Roboter nur unter Einsatz von Sensorik möglich, da die Trajektorien der Radnaben aufgrund von Störungen wie beispielsweise dem Schwingen der Karosse in einer Elektrohängebahn nicht mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden können [1]. Eine förderbandsynchrone automatisierte Montage erfordert daher einen speziellen Prozessablauf bestehend aus einer Grobpositionierungsphase, einer Annäherungsphase und einer Kontaktphase, siehe [1],[2].

Dieser Artikel beschreibt ein Verfahren, bei welchem unterschiedliche Sensorsysteme eingesetzt werden, um die Bewegung einer Karosse während der Annäherungsphase zu verfolgen. Der für die Untersuchungen realisierte Prototyp (Bild 1) besteht neben dem transportierten Fahrzeug aus einem Roboter auf einer Linearachse und den folgenden Sensoren:

- einem Encoder im Motor der Fördereinrichtung für die grobe Erfassung des Fahrzeugs im Bereich der Montagestation,

- einer Kamera für das genaue Vermessen der Trajektorie der Radnabe in allen 6 Freiheitsgraden, bis der Kontakt zwischen Rad und Radnabe hergestellt ist und
- einem nachgiebigen Kraft-Momentensensor, welcher verbleibende Ungenauigkeiten während des mechanischen Kontaktes toleriert und ihre Ausregelung ermöglicht.



Bild 1: links: Gesamtanordnung zum Anbau von Rädern an bewegte Fahrzeuge
rechts: Endeffektor mit Greifern, Schraubern und Kamera mit Ringleuchte im Zentrum

2. Ablauf und Anordnung

Die Bildverarbeitung wird sowohl bei der Aufnahme der Räder als auch bei der Montage an die Radnaben verwendet.

Zum Greifen eines Rades durch den Roboter bestimmt die Bildverarbeitung zumindest den Winkel zwischen der realen Felge und der Referenzlage, damit die Radschrauben in die dafür vorgesehenen Bohrungen der Felge gesteckt werden können.

Beim Heranführen des Rades an die Radnabe wird die Lage der Radnabe bezüglich der Referenzlage in allen 6 Freiheitsgraden bestimmt. Diese sind

- der Winkel um die Radachse, damit die Radschrauben in die Gewindebohrungen der Radnabe geschraubt werden können,
- die durch Bandbewegung und Schwingen der Karosse im Gehänge gestörte Position der Radnabe und ihre Änderung,
- der Lenkwinkel und der Sturz der Radnabe.

Zur Bestimmung dieser Parameter und insbesondere zum Verfolgen der Radnabe eignet sich insbesondere eine robotergeführte Kamera, da dadurch kaum Verdeckungen bestehen.

Besonders günstig ist eine Anordnung der Kamera, in der sie durch das in jeder Felge vorhandene Achsloch hindurchblickt (Bild 2). In Kombination mit einer Ringbeleuchtung (Bild 1) kann dadurch sowohl bei der Radaufnahme als auch bei der Annäherung an die Radnabe bei optimaler Beleuchtung und aus minimalem Abstand gemessen werden.

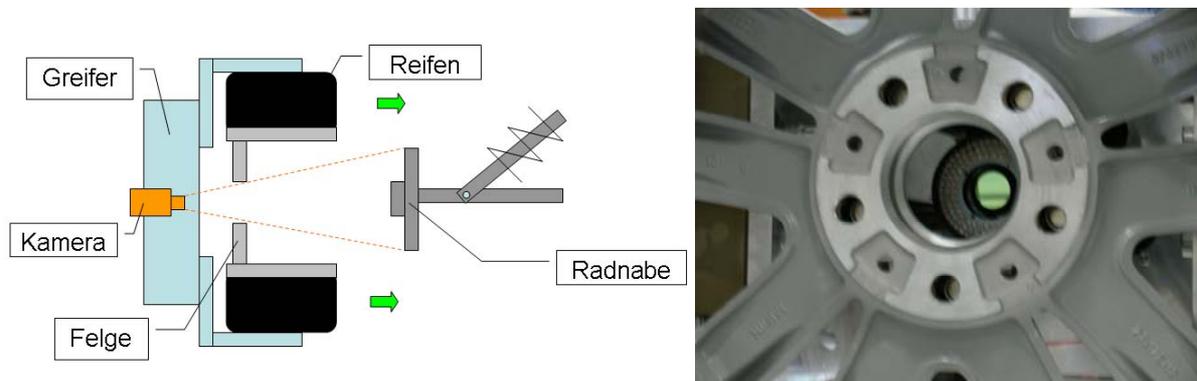


Bild 2: Anordnung mit durch das Achsloch blickender Kamera und Greiferkamera mit Felge

3. Bestimmung der Lage des zu greifenden Rades

Bei der Vermessung des Rades muss berücksichtigt werden, dass es unterschiedliche Felgentypen (Bild 3) und unterschiedliche Reifengrößen gibt. Daher werden nur die für die Montage wichtigen Löcher für die Radschrauben vermessen. Um die Löcher besser sichtbar zu machen, wird das von der Ringleuchte an der Kamera ausgestrahlte Licht mit Hilfe einer Reflexfolie zu einer diffusen Hintergrundbeleuchtung der Radöffnungen verbessert (Bild 6). Durch Matching der gemessenen Merkmale mit den erwarteten Merkmalen aus dem Radmodell werden die Bohrungen erkannt. Daraus wird sowohl der Winkel um die Radachse als auch die durch die unterschiedlichen Reifengrößen unsichere Position der Radmitte bestimmt. Die Vermessung der Lage des Rades erfolgt bereits während der Annäherungsbewegung. Somit kann die Rotation des Endeffektors, die bei einer 5-Loch-Felge bis zu 36 Grad beträgt, frühzeitig beginnen.



Bild 3: Mögliche zu vermessende Räder

4. Bestimmung der Lage der Radnabe für die Montage

Bei der Annäherung an das Fahrzeug werden sowohl die Gewindebohrungen für die Radschrauben als auch die Achse selbst vermessen. Die im linken Teil von Bild 4 außerdem gut erkennbare Begrenzung der Radnabe ist in der Draufsicht dagegen kaum sichtbar. Auch die Bohrungen für die Radschrauben verschwinden bei der Annäherung an die Radnabe aus dem Sichtfeld der Kamera. Dadurch ist die Bestimmung der Orientierungen nur aus größerem Abstand möglich. Das Tracken der Position ist jedoch bis zum Kontakt möglich. Dies ist besonders wichtig, wenn während eines Band-Stopps oder kurz nach einem Bandanlauf montiert werden soll.



Bild 4: Ansicht der Radnaben von Vorder- und Hinterrad

4.1 Bestimmung der Position

Bei der Initialisierung des Trackingsystems wird anhand von a priori Wissen (bekannte Größe und erwarteter Abstand) nach einer stark kreisförmigen Ellipse in einem bestimmten Größenfenster gesucht (Achszapfen). Dazu wird zunächst eine konturbasierte Modellsuche durchgeführt, die den Bereich der darauf folgenden Suche definiert. Dies ist nur zu Beginn nötig, bzw. wenn das Tracking abreißt. Ansonsten wird der Suchbereich aus den jeweils vorangegangenen Bildern extrapoliert.

Im Folgenden wird eine Konturextraktion mit anschließender Filterung durchgeführt. An die erhaltenen Konturen werden Ellipsen gefittet. Aus den somit erhaltenen Kandidaten für den Achszapfen wird nach Qualität der Ellipse und Größe im Vergleich zum Modell die zum Achszapfen gehörige Ellipse ausgewählt. Aus ihren Parametern wird die Position der Radnabe bestimmt. Die Größe und Position der Ellipse wird auch als Modell für die Untersuchung des nächsten Bildes gespeichert.

4.2 Bestimmung des Winkels um die Radachse

Im 2. Schritt wird anhand der Größe der gefundenen Ellipse des Achszapfens mit a priori Wissen (Lochkreisdurchmesser) eine Region ausgewählt, in der die Gewindebohrungen erwartet werden. Die in diesem Bereich liegenden Konturen aus Abschnitt 4.1 werden nun nach Ellipsen durchsucht, deren Größe wiederum mit Hilfe von a priori Wissen (Lochdurchmesser) eingeschränkt werden kann.

Die nun gefundenen Ellipsen werden daraufhin untersucht, ob sie in das erwartete Muster der Radnabe passen (ein Pentagon mit einem extra Punkt, siehe Bild 7). Alle unpassenden Ellipsen werden aussortiert. Der Winkel der Radnabe um die Kameraachse wird schließlich mit Hilfe des berechneten Pentagons bestimmt.

4.3 Bestimmung der Kippwinkel

Die Bestimmung der beiden Kippwinkel (Sturz und Lenkwinkel) ist bezüglich der Auflösung kritisch, da das Problem bei geringen Winkeln und der fast ebenen Anordnung singulär ist. Zur Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit werden zwei Verfahren mit unterschiedlichem Aufwand implementiert.

4.3.1 Bestimmung der Kippwinkel aus den vorhandenen Merkmalen

Im einen Fall werden die ermittelten Gewindebohrungen mit einer hochpräzisen Kantenanastastung sehr genau vermessen. Aus ihren Positionen im Vergleich zur Position des Achszapfens wird das Vorzeichen der Verkippung der Radnabe bestimmt. Dabei ist es günstig, dass der Achszapfen gegenüber der Radnabe etwas vorsteht, also in einer anderen Ebene liegt als die Gewindebohrungen. Anschließend wird aus dem Winkel und dem Verhältnis der Halbachsen der Ellipse, die dem Achszapfen zugeordnet ist, die Richtung und das Ausmaß der Verkippung der Radnabe bestimmt.

4.3.2 Bestimmung der Kippwinkel durch Triangulation mit künstlichen Merkmalen

Für das andere Verfahren werden seitlich zur Kamera zwei Laser angeordnet, die Ebenen erzeugen und somit Linien auf die Radnabe projizieren. Durch Triangulation wird aus den Positionen und Orientierungen der beiden Linien auf der Ebene der Radnabe deren Gleichung berechnet. Dazu muss vorher die Lage der Kameras und der Laser zu einander und bezüglich des Tool Center Points (TCP) bestimmt worden sein [3].

Konkret wird auf die Ebene

$$A_o x + B_o y + z + D_o = 0 \quad (1)$$

der Radnabe bezüglich des Kamerasystems bei einer im Kamerasystem bekannten Laser-ebene

$$A_j x + B_j y + C_j z + D_j = 0 \quad (2)$$

eine Linie projiziert, die durch mindestens 3 Gleichungen

$$(-D_j x_i \quad -D_j y_i \quad A_j x_i + B_j y_i + C_j)(A_o \quad B_o \quad D_o)^T = D_j \quad (3)$$

aus den gemessenen Punkten (x_i, y_i) in normalisierten Kamerakoordinaten ($z_i = 1$) bestimmt wird. Dabei sind mindestens 2 Laserebenen j nötig, deren Punkte voneinander unterschieden werden können.

Diese Methode erlaubt kein fortwährendes Nachführen der Parameter, da sie aus Kontrastgründen nur bei ausgeschalteter Ringlampe möglich ist und somit nur einmalig zu Beginn der Annäherung erfolgt. Auf der anderen Seite ist dieses Verfahren genauer, da der Abstand Kamera-Laser als Basis für eine räumliche Vermessung wirkt und da man nicht auf die beleuchtungsabhängige Ermittlung der Positionen der Gewindebohrungen angewiesen ist.

5. Regelung

Die Lagebestimmung in den Abschnitten 3 und 4 erfolgt zunächst in Kamerakoordinaten. Zum Nachführen des Roboters wird die ermittelte Position und Orientierung der Felge bzw. der Radnabe ${}^c\mathbf{T}_o$ (Objektlage) unter Verwendung der bekannten Lage ${}^t\mathbf{T}_c$ der Kamera bezüglich des TCP und der aus den Achswerten berechneten Lage ${}^w\mathbf{T}_t$ des TCP in das Robotersystem (Weltsystem) transformiert.

$${}^w\mathbf{T}_o = {}^w\mathbf{T}_t \cdot {}^t\mathbf{T}_c \cdot {}^c\mathbf{T}_o \quad (4)$$

Dabei wird neben den Gelenkwinkeln des Roboters auch die Auslenkung des nachgiebigen Kraft- Momentensensors berücksichtigt, da sie die Lage der Kamera beeinflusst [4].

Zusammen mit den Messwerten wird jeweils auch der Zeitpunkt der Bildaufnahme festgehalten. Dies erlaubt Messungen während der Bewegung des Roboters. Durch Berechnung der Sensorkorrektur ${}^r\mathbf{T}_d$

$${}^r\mathbf{T}_d = {}^n\mathbf{T}_o = {}^w\mathbf{T}_n^{-1} \cdot {}^w\mathbf{T}_o \quad (5)$$

gegenüber einer Referenztrajektorie ${}^w\mathbf{T}_r$ ist auch die gleichzeitige Bewegung der Radnabe aufgrund von Bandbewegung oder Schwingungen der Karosse zulässig. Dabei beschreibt ${}^w\mathbf{T}_n$ die nominale Objektposition, die der Referenztrajektorie entspricht. Mögliche Verzögerungen der Lagebestimmung durch Rechen- oder Kommunikationszeiten der Bildverarbeitung werden dabei berücksichtigt. Ein Kalman Filter erlaubt schließlich eine prädiktive Bestimmung der Lage der Radnabe.

Die eigentliche Regelung erfolgt dann als Positionsregelung der durch ${}^r\mathbf{T}_d$ gegebenen Trajektorie. Dabei werden die einzelnen Achsen des Roboters durch prädiktive Regelung so vorgesteuert, dass der Roboter die gewünschte Bewegung ausführt [5]. Die durch die Roboterbewegung angeregte Schwingung des Kraft- Momentensensors wird eigens berücksichtigt [6]. Diese Aspekte sind in [4] ausführlich dargestellt.

6. Kalibrierung

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen ist die Ermittlung der intrinsischen und extrinsischen Parameter der Kamera erforderlich. Dies geschieht anhand von Bildern, die bei gesteuerten Bewegungen an einem Kalibriermuster aufgenommen wurden [7 bis 8]. Dabei beziehen sich die extrinsischen Parameter auf den vorgegebenen TCP. Dieser kann sich jedoch vom wahren Mittelpunkt des im Greifer gehaltenen Rades unterscheiden. Daher muss zunächst ohne Bandbewegung überprüft werden, ob Radmittelpunkt und TCP übereinstimmen, ob also die zum TCP kalibrierte Kamera die Felge zentrisch auf die Radnabe fängt.

Bei Bestimmung der Kippwinkel unter Verwendung von projizierten Laserebenen muss auch die Lage der Laser bezüglich der Kamera kalibriert werden. Dies erfolgt nach [3] durch Tracking der auf eine ebene Fläche projizierten Linien bei Bewegung des Roboters.

7. Ergebnisse

Die Experimente erfolgen an der Anordnung nach Bild 1 und 2. Dabei beginnt die Messung in einem Abstand der Kamera von der Radnabe von etwa 600 mm. Beim Kontakt hat die Kamera noch einen Abstand von etwa 100 mm. Somit reicht ein Öffnungswinkel von 40 Grad, um die Radnabe in maximaler Größe zu sehen. Die Maße der Radnabe sind bei

der verwendeten BMW Karosse: Achslochdurchmesser 70 mm, Achszapfenhöhe 10 mm, Lochkreisdurchmesser 120 mm. Die Bandgeschwindigkeit beträgt etwa 100 mm/s.

Nach der Kalibrierung wird zunächst die Genauigkeit der Messwerte bestimmt, indem der Roboter sich bei unbewegter Karosse der Radnabe nähert und dabei entsprechend den Bohrungen ausrichtet. Bild 5 zeigt aus den einzelnen Bildern berechnete Lagen der Radnabe, transformiert in das durch die spätere Kraftmessung bestimmte Objektsystem. Bei optimaler Kalibrierung und ohne Störungen würden die Kurven alle Geraden auf der Zeitachse beschreiben. In dem Beispiel aus Bild 5 ist die Kamera also fehlerhaft kalibriert, was zu einem suboptimalen Einschwingen in die Ziellage führen würde. Außerdem kann man an Bild 5 die erreichbare Genauigkeit ablesen, die nach geeigneter Filterung bei etwa 1 mm liegt.

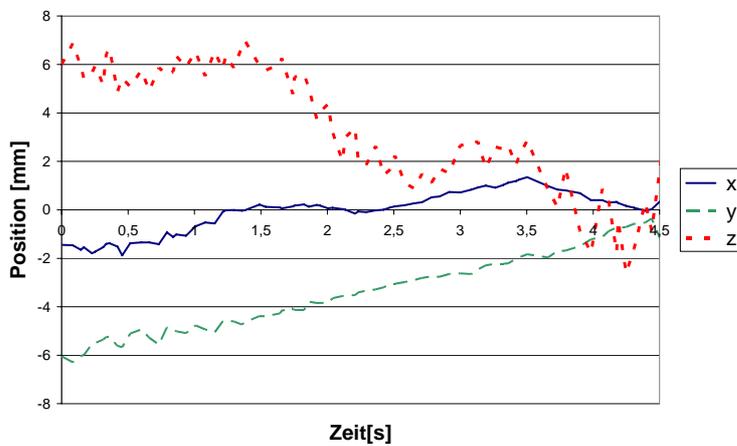


Bild 5: Ermittelte absolute Position der Radnabe ohne Bandbewegung

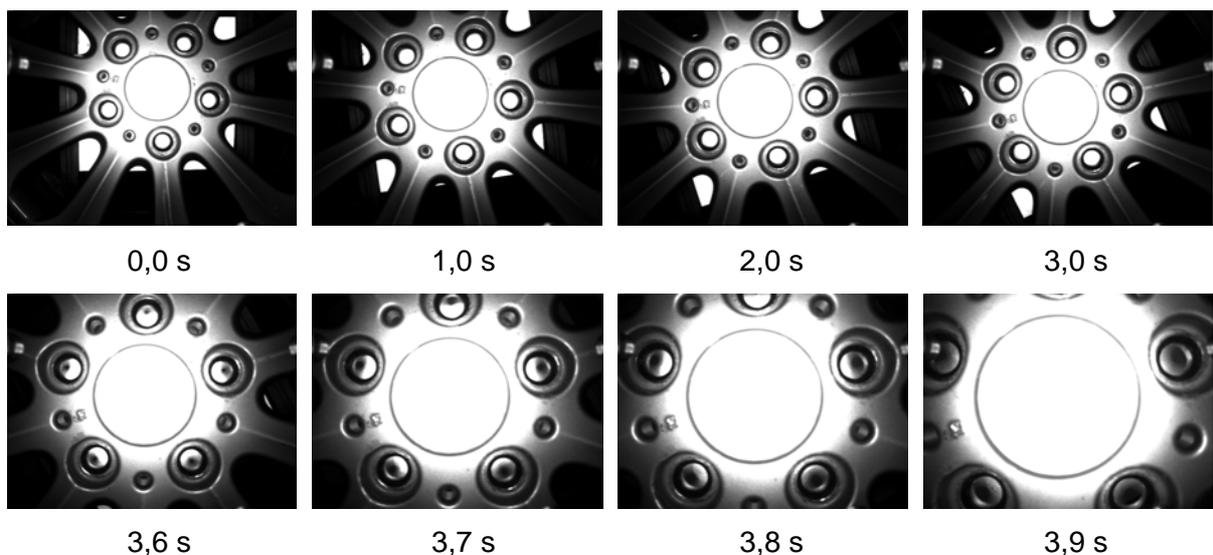


Bild 6: Bilder der robotergeführten Kamera während der Annäherung an die Felge

Bild 6 zeigt die Bilder der robotergeführten Kamera bei der Radaufnahme. Deutlich sichtbar erfolgt zuerst die Rotation des Endeffektors und dann die Annäherung. Eine Bildauswertung zur Bestimmung der Orientierung ist nur möglich, solange die Bohrungen sichtbar sind.

Bild 7 zeigt die Annäherung an die mit unbekannter Geschwindigkeit bewegte Radnabe. Hier beginnt die Annäherung bereits während der die Rotation. Kurz vor dem Kontakt wird die Bewegung abgebremst.

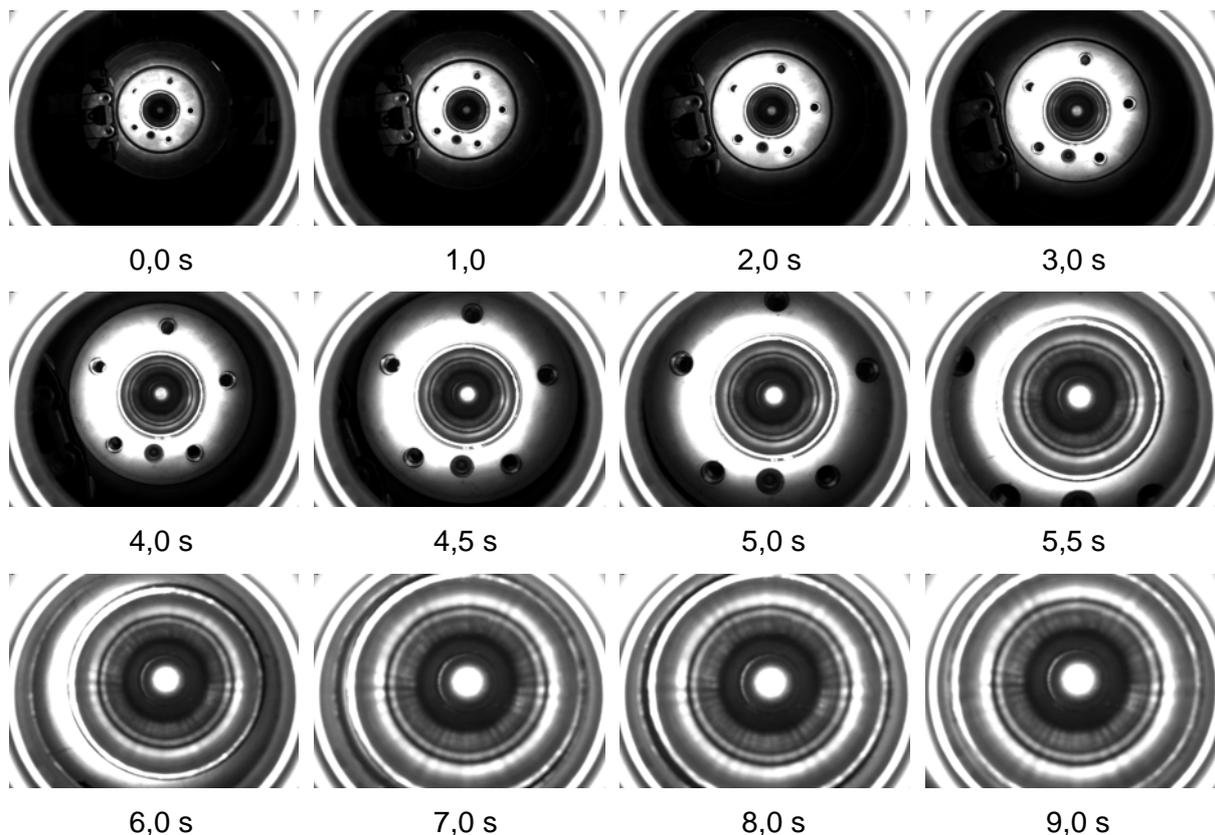


Bild 7: Bilder der robotergeführten Kamera während der Annäherung an die Radnabe am bewegten Band

Im Rahmen der ermittelten Genauigkeit und in Anbetracht der stochastischen Anteile der Förderbewegung führt die Bildverarbeitung den Roboter exakt der Radnabe nach. Beim Eintreten des Kontakts am Ende der bildgestützten Annäherungsphase wird die sich durch die maximale Auslenkung des nachgiebigen Kraft- Momentensensors von ± 2 mm bzw. ± 2 Grad ergebende Genauigkeitsanforderung für die resultierenden Lagefehler mit 1 mm und 0,2 Grad deutlich unterschritten.

8. Zusammenfassung

Das Verfahren zeigt, dass robotergestützte Montageaufgaben mit geringen Toleranzen auch während der Bewegung der zu verbindenden Teile robust durchgeführt werden können, indem Bildverarbeitung und (Kraft-)Regelung geeignet kombiniert werden. Dabei werden im ausgeführten Beispiel alle 6 Freiheitsgrade der Radnabe bezüglich der Kamera bestimmt.

9. Danksagung

Das Verfahren beschreibt die Funktionsweise der Bildverarbeitung in dem von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderten Projekt zur Montage in Bewegung (MiB). Die Autoren möchten hiermit allen am Projekt Beteiligten für ihre Unterstützung danken.

10. Literaturangaben

- [1] Reinhart, G.; Werner, J.: Flexible Automation for the Assembly in Motion. Annals of the CIRP, 2007. 56(1): p. 25-28.
- [2] Lange, F.; Frommberger, M.; Jörg, S.; Langwald, J.; Kamel, A.; Meusel, P.; Willberg, B.; Hirzinger, G.; Werner, J.: Montage am kontinuierlich bewegten Band – Sensorkonfiguration und Programmierung. Fachtagung ROBOTIK 2008, München, Juni 2008.
- [3] Strobl, K. H.; Sepp, W.; Wahl, E.; Bodenmüller, T.; Suppa, M.; Seara, J. F.; Hirzinger, G.: The DLR Multisensory Hand-Guided Device: The Laser Stripe Profiler. Proc. Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), New Orleans, pp. 1927--1932
- [4] Lange, F.; Kamel, A.; Hirzinger, G.: Sensorfusion und Regelung eines Roboters am kontinuierlich bewegten Band. Fachtagung Automation 2008, Baden-Baden, Juni 2008.
- [5] Lange, F., Hirzinger, G.: Learning of a Controller for Non-Recurring Fast Movements. Advanced Robotics, 1996.
- [6] 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.
- [7] Strobl, K. H., Sepp, W., Fuchs, S., Paredes, C., Arbter, K.: DLR CalLab and DLR CalDe, Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany, <http://www.robotic.dlr.de/callab/>
- [8] Strobl, K. H.; Hirzinger, G.: Optimal Hand-Eye Calibration, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS, Beijing, China, October 2006, pp. 4647-4653.