

Sensorfusion und Regelung eines Roboters am kontinuierlich bewegten Band

Dr.-Ing. **F. Lange**, **A. Kamel**, Prof. Dr.-Ing. **G. Hirzinger**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Weßling

Dipl. Wirtsch.-Ing. **J. Werner**
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU
München, Augsburg

Kurzfassung

Der Artikel beschreibt die Montage eines Anbauteils an ein kontinuierlich bewegtes Basisbauteil, dessen Bewegung durch unterschiedliche Sensoren gemessen wird. Dabei werden u. a. die Ergebnisse einer Bildverarbeitung mit den Auslenkungen eines nachgiebigen Kraft- Momentensensors fusioniert. Aus den Bahnpunkten wird dann eine geglättete Solltrajektorie für das Anbauteil bestimmt. Die Regelung des Roboters wird durch Vorsteuerungen ergänzt, die die dynamischen Verzögerungen und Schwingungen von Roboter und Endeffektor prädiktiv kompensieren.

1. Einleitung

Bei der Montage von Komponenten durch einen Roboter wird im Allgemeinen ein robotergeführtes Anbauteil an ein still stehendes Basisbauteil gefügt. Im Bereich der Fließbandmontage bedeutet das zusätzlichen Aufwand, um das Basisbauteil aus dem Fließprozess herauszunehmen [1][2]. Die direkte Montage während der Bewegung wird dagegen wegen der Genauigkeitsproblematik vermieden, da dazu einerseits zusätzliche Sensorik und andererseits ein leistungsfähiges Regelungskonzept erforderlich ist.

Bei einer Montage in Bewegung ist die Trajektorie des Montageortes grundsätzlich unsicher, kann also nicht durch Teachern hochgenau programmiert werden. Zusätzlich enthält die Trajektorie des Basisbauteils u. U. hochfrequente Komponenten (Ruckeln oder Stöße), die von einem Roboter nur verzögert ausgeregelt werden können [3]. Schließlich muss mit Schwingungen gerechnet werden, insbesondere beim Band-Stopp und beim Wiederanlauf des Bandes. Beides kommt im normalen Betrieb öfters vor.

Die Fließbandmontage wird am realisierten Beispiel der Montage von Rädern an eine bewegte Kfz-Karosserie erläutert (siehe Bild 1). Die beschriebene Vorgehensweise lässt sich aber auch auf andere Montageaufgaben übertragen [3]. Zunächst werden Schrauben aus

einer festen Halterung entnommen. Dann wird ein Rad gegriffen, wobei die Zuführung die Orientierung um die Radachse nicht definiert. Schließlich wird das Rad an eine durch eine Elektrohängebahn transportierte Radnabe gefügt und verschraubt. Dabei ist weder der Lenkwinkel noch die Orientierung der Radnabe um die Radachse vorgegeben.

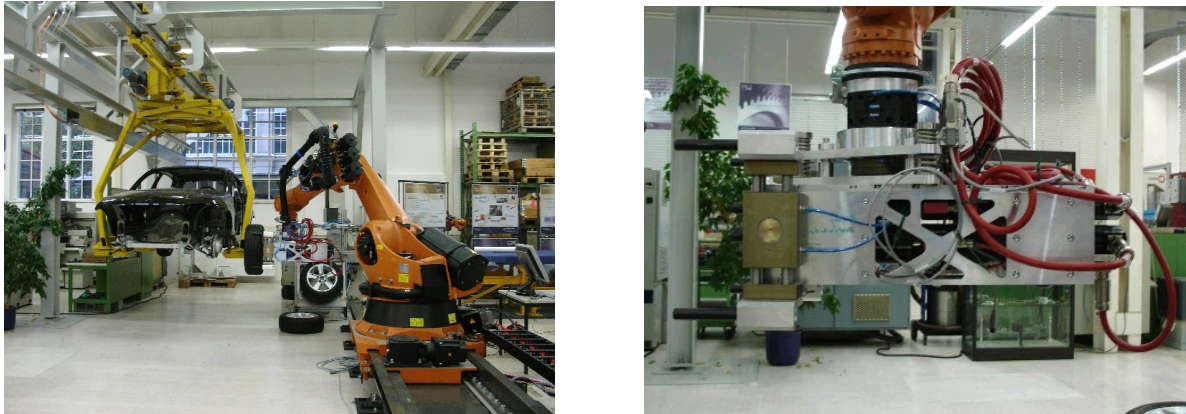


Bild 1: links: Gesamtansicht mit einem auf einer Linearachse montierten KUKA-Roboter und einer durch eine Elektrohängebahn transportierte Karosse;
rechts: Detailansicht des Endeffektors mit nachgiebigem Kraft-Momenten-Sensor

2. Versuchsaufbau

Es wird ein Ansatz gewählt, bei dem während der gesamten Bewegung die Lage der Radnabe durch Sensoren verfolgt wird. Dazu sind drei Arten von Sensoren erforderlich:

- Insbesondere während der Grobpositionierungsphase wird ein an der Fördereinrichtung montiertes Messsystem benötigt, das ermittelt, ob das Basisbauteil im Messbereich der weiteren Sensoren ist, also z. B. im Blickfeld einer robotergeführten Kamera.
- Sofern das der Fall ist, wird während der Annäherungsphase durch einen berührungslos messenden Sensor geregelt, z. B. durch eine Kamera mit dazugehöriger Bildverarbeitung.
- Sobald Rad und Radnabe mit einander Kontakt haben, muss ein Sensor verwendet werden, der die Kontaktkräfte und –momente erfasst.

Bei der vorliegenden Anwendung wird zunächst ein Encoder verwendet, der die Komponente der Fahrzeuglage in Förderrichtung angibt. Seine Genauigkeit ist durch ggf. auftretende Schwingungen begrenzt, da die Messung am Aufhängepunkt des C-Gehänges erfolgt.

Als weiteres berührungslos messendes System wird eine CCD-Kamera verwendet. Dadurch können alle 6 Komponenten der Lage der Radnabe relativ zum Roboter bestimmt werden

[4]. Außerdem erlaubt eine Kamera die Bestimmung der Radorientierung bei der Radaufnahme. Die Kamera wird so angeordnet, dass sie bei gegriffenem Rad durch die Achsöffnung in der Felge blickt und somit die Radnabe während der gesamten Annäherungsphase im Sichtfeld hat.

Für den Kontaktfall wird ein nachgiebiger Kraft- Momentensensor benötigt, um den hochfrequenten Anregungen auch passiv, also ohne Roboterbewegung nachzugeben. Dies ist nötig, da mögliche Stöße die Radnabe schneller bewegen können, als der Roboter nachgeführt werden kann. Ein nachgiebiger Sensor (Bild 1 rechts) zwischen Roboterflansch und Kontaktpunkt bewirkt jedoch eine Schwingungsneigung des gesamten Endeffektors, die regelungstechnisch ausgeglichen werden muss.

Der Roboter wird durch die Standardsteuerung KRC2 geregelt, wobei über eine Sensorschnittstelle im IPO-Takt von 12 ms die Achsistwerte gemessen und neue Achssollwerte kommandiert werden können. Ähnliches ist mit der bei KUKA verfügbaren RSI-Schnittstelle möglich.

3. Ansatz zur Steuerung und Regelung

Eine direkte Berücksichtigung der Sensordaten, z. B. durch eine Momentenrückkopplung, ist aufgrund der Sensorschnittstelle zum Roboter (\mathbf{q}_c und \mathbf{q} in Bild 2) nicht möglich. Daher wird ein Ansatz mit Positionsregelung als innerem Kreis (grüner Block in Bild 2) und der Rückführung der externen Sensordaten im äußeren Kreis (violetter Block in Bild 2 und 3) verwendet. Dies ist auch im Sinne der Trennung von roboterspezifischen und anwendungsspezifischen Komponenten sinnvoll.

Der positionsgeregelte innere Kreis wird so entworfen, dass er einen *idealen Roboter* repräsentiert, bei dem zu allen Zeitpunkten die kartesischen Sollwerte $\mathbf{x}_d(k)$ und die gemessenen Istwerte $\mathbf{x}(k)$ (vgl. (5)) identisch sind. Zur Erleichterung der Positionsregelung wird in jedem Abtastschritt nicht nur die Solllage $\mathbf{x}_d(k)$ sondern eine Solltrajektorie $\mathbf{x}_d(k+i)$ mit $i=0, \dots, n_d-1$ vorgegeben. Dadurch kann ein *idealer Roboter* bei programmierten Bahnen im Rahmen der Stellgrößenbeschränkungen nahezu erreicht werden. Bei sensorgestützten Bahnkorrekturen ist dagegen die Vorgabe von $\mathbf{x}_d(k+i)$ für zukünftige Zeitpunkte nur ungenau möglich. Dadurch kann sich die Bahngenauigkeit verschlechtern.

Aufgrund der nachgiebigen Sensoranordnung treten große Beschleunigungen insbesondere durch die programmierte Bahn auf, während Sensorkorrekturen gefiltert werden. Somit lässt sich die gewünschte Bahn gut vorhersagen, was den Ansatz rechtfertigt.

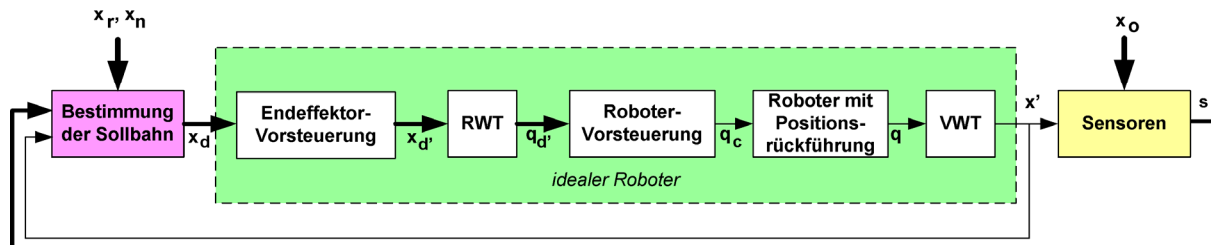


Bild 2: Blockschaltbild der Regelung (RWT und VWT bezeichnen die kinematische Rückwärts- und Vorwärtstransformation)

Zur Positionsregelung eignet sich eine dynamische Vorsteuerung der gewünschten Trajektorie, die zusätzlich zur steuerungsinternen Positionsrückführung erfolgt (siehe Bild 2). Das heißt, dass ein nichtkausales Vorfilter aus der Solltrajektorie zu jedem Zeitpunkt die Stellgrößen q_c bestimmt. Dabei wird durch die Vorsteuerung sowohl die Roboterdynamik [5] als auch die Schwingung des Endeffektors [6] berücksichtigt (siehe Bild 2). Die beiden Positionsvorsteuerungen werden in Kapitel 4 näher erläutert.

Verbleibende Regeldifferenzen, die z. B. durch eine schlecht vorhergesagte Trajektorie entstehen, können prinzipiell durch Vergleich der Ist- und Sollwerte reduziert werden, wobei die Stellgrößenbeschränkungen der Beschleunigung enge Grenzen setzen. Daher wird auf diese zusätzliche Rückführung verzichtet. Im Gegenteil wird bei der Bestimmung der Solltrajektorie auf ausreichende Glättung geachtet. Dies wird erreicht, indem die Trajektorie über jeweils etwa 0,5 s vorhergesagt wird. Dies ist aus den gemessenen Sensordaten möglich, da die hochfrequenten Anteile nicht korrekt prädiziert werden müssen.

Durch den Verzicht auf eine zusätzliche Rückkopplung ist die Stabilität bei diesem Ansatz inhärent gesichert.

4. Positionssteuerung

Ein *idealer Roboter* benötigt als Eingang die Solltrajektorie über die nächsten n_d Abtastschritte. Dies muss von der Sollbahnbestimmung konsistent geliefert werden, d. h. $x_d(k_1)$ für einen Zeitpunkt k_1 muss ab dem Zeitpunkt $k = k_1 - n_d + 1$ prädiziert werden.

4.1 Vorsteuerung der Roboterdynamik

Die Roboterdynamik ist bei Betrachtung im Gelenkraum näherungsweise entkoppelt. Daher lassen sich die Sollwerte (Kommandos) für die steuerungsinternen Gelenkregler nach [5] durch

$$\mathbf{q}_c(k) = \mathbf{q}_{d'}(k) + \sum_{i=1}^{n_d} \mathbf{R}_i (\mathbf{q}_{d'}(k+i) - \mathbf{q}_{d'}(k)) \quad (1)$$

vorgeben, wobei die \mathbf{R}_i die Reglermatrizen sind, die durch Parameteradaption bestimmt werden (siehe [5]).

4.2 Schwingungsdämpfung des Endeffektors

Die Schwingung des Endeffektors ist unabhängig von der Gelenkstellung. Daher liegt eine Betrachtung der kartesischen Lagekomponenten nahe. Die Schwingungsdämpfung erfolgt durch Input Shaping nach [6]. Die Solllage eines als starr angenommenen Endeffektors ergibt sich durch

$$\mathbf{x}'_d(k) = \sum_{i=-n_{e_1}}^{n_{e_2}} \mathbf{A}_i \mathbf{x}_d(k+i). \quad (2)$$

Dabei werden die Parameter \mathbf{A}_i modellgestützt bestimmt. Auch hierbei handelt es sich bei $n_{e_2} > 0$ um eine Art Vorsteuerung.

5. Bestimmung der Sollbahn

Die Sollbahn ergibt sich aus einzelnen Solllagen, die aufgrund von geometrischen Beziehungen bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass die Sensoren die reale Lage \mathbf{x}_o eines Objekts messen, dessen nominelle Lage durch $\mathbf{x}_n(k)$ gegeben ist. Die Sollposition für einen Zeitpunkt k ergibt sich dann prinzipiell durch

$$\mathbf{x}_d(k) = \mathbf{x}_r(k) + \hat{\mathbf{x}}_o(k) - \mathbf{x}_n(k) \quad (3)$$

aus der Referenzposition \mathbf{x}_r , die (mit \mathbf{x}_n) den gewünschten Abstand des Roboters vom vermessenen Objekt definiert. Die Sollorientierung ergibt sich entsprechend durch Multiplikation der entsprechenden homogenen Transformationsmatrizen.

Mehrere Sensoren ergeben nach Bild 3 unterschiedliche Schätzwerte für die Objektlage $\hat{\mathbf{x}}_o$ und somit unterschiedliche Sensorkorrekturen, die geeignet fusioniert werden (Abschnitt 5.2). Dann wird durch Prädiktion der Sensorkorrekturen eine Trajektorie berechnet (Abschnitt 5.3), die geglättet (Abschnitt 5.4) als Solltrajektorie \mathbf{x}_d für den *idealen Roboter* wirkt.

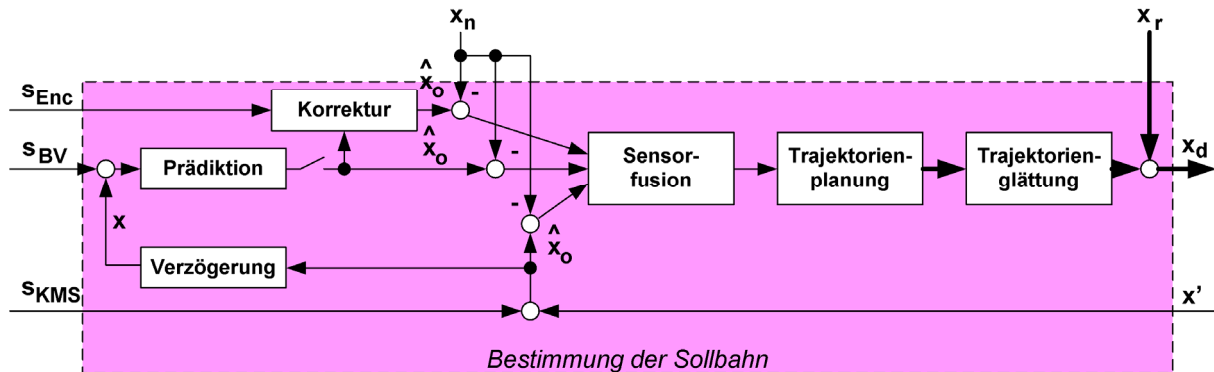


Bild 3: Blockschaltbild der Bestimmung der Sollbahn

5.1 Bestimmung der Objektposition aus den Sensorwerten

Je nach Art des Sensors berechnen sich die geschätzten Objektlagen unterschiedlich:

- Beim Bildverarbeitungssystem ergibt die Bildinformation die Objektlage bezüglich der Kameralage. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies

$$\mathbf{s}_{BV}(k) = \hat{\mathbf{x}}_o(k') - \mathbf{x}(k'), \quad (4)$$

wobei \mathbf{x} die um die Auslenkung des Kraftsensors korrigierte und um die Rechenzeit der Bildverarbeitung verzögerte Istposition der Kamera ist. Das somit berechnete $\hat{\mathbf{x}}_o$ muss dann prädiziert werden, da die Bildinformation nicht den aktuellen Zustand widerspiegelt. Diese Objektlage steht nicht in jedem Abtastschritt zur Verfügung.

- Beim Encoder steht der Sensorwert \mathbf{s}_{Enc} dagegen direkt für die geschätzte Objektposition. Der Wert ist jedoch aufgrund der oben erwähnten Schwingungen oder durch einen Offset fehlerbehaftet. Daher wird, sofern Bilddaten verfügbar sind, der jeweils aktuelle Fehler ermittelt und zukünftig addiert. Auf diese Art kann der Encoder auch nach der Anfangsphase noch verwendet werden, z. B. um während des Rückzugs des Roboters vom Band noch einen ggf. auftretenden Band-Stopp zu erkennen.
- Beim nachgiebigen Kraft- / Momentensensor wird anstelle der Kräfte und Momente direkt die Auslenkung des Sensors gemessen. Somit kann die Lageabweichung ähnlich wie bei der Bildverarbeitung durch Addition von Auslenkung und Istposition \mathbf{x}' bei als starr

angenommenem Endeffektor, bzw. durch eine entsprechende homogene Transformation, bestimmt werden.

Kurz vor dem erwarteten Kontakt wird die durch das Eigengewicht bedingte Auslenkung \mathbf{s}_0 des Sensors gemessen und zukünftig bei der Bestimmung von Kontakt abgezogen.

Nach Auftreten von Kontakt wird der Istwert der Roboterstellung durch

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}' + \mathbf{s}_0 \quad (5)$$

ohne die kontaktbedingte Auslenkung berechnet, da die gesamte Auslenkung die Objektposition

$$\hat{\mathbf{x}}_o = \mathbf{x}' + \mathbf{s}_{KMS} \quad (6)$$

ergibt.

5.2 Sensorfusion

Die unterschiedlichen Sensoren werden überwiegend nacheinander verwendet. Durch Fusion aller jeweils verfügbaren Daten ergeben sich jedoch Vorteile, wenn z. B. während der Rechenzeit der Bildverarbeitung ein Band-Stopp erfolgt, den das Messsystem an der Fördereinrichtung sofort erfasst oder wenn im Übergang zum Kontakt durch den taktilen Sensor nur die Normalkraft sensiert wird, während die Führung zu gering für die übrigen Komponenten ist.

Die Sensorfusion selbst wird durch ein Kalman Filter realisiert, bei dem die Sensorkorrektur durch alle verfügbaren Sensorwerte mit ihren im jeweiligen Zustand vorhandenen Genauigkeiten geschätzt wird, also z. B.

$$\mathbf{x}_o^*(k+1) - \mathbf{x}_n(k+1) = \mathbf{A}(k)(\mathbf{x}_o(k) - \mathbf{x}_n(k)) + \mathbf{b}(k) \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_o(k+1) = \mathbf{x}_o^*(k+1) + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}_{oBF}(k+1) - \mathbf{x}_o^*(k+1)) \quad (8)$$

wobei \mathbf{K} die (zeitvariante) Kalman Verstärkung darstellt. Dabei berücksichtigt (7) eine ggf. bekannte Schwingungsgleichungen der Karosse mit den Parametern $\mathbf{A}(k)$ und $\mathbf{b}(k)$.

5.3 Trajektorienplanung

Abschnitte 5.1 und 5.2 bestimmen nur die aktuelle Solllage. Für den *idealen Roboter* werden dagegen auch die Werte von $n_d - 1$ zukünftigen Abtastschritten benötigt. Dies geschieht

durch Prädiktion der Sensorkorrektur $\hat{\mathbf{x}}_o(k) - \mathbf{x}_n(k)$. Dadurch werden die Beschleunigungen der Referenztrajektorie unverändert übernommen, z. B. das Abbremsen am Ende der Annäherungsphase. Die Prädiktion ist im einfachsten Fall die Addition des Geschwindigkeitsfehlers der Fördereinrichtung. Sie wird durch Differenzbildung aus den ermittelten Solllagen bestimmt, wobei bei Nutzung der Bildverarbeitung nur die Abtastschritte mit neuen Informationen betrachtet werden. Sofern bei der Sensorfusion ein Modell der Karossenbewegung existiert, kann dieses auch zur Prädiktion ausgenutzt werden. Alternativ kann eine Extrapolation nach [7] erfolgen. Ohne besondere Information wird durch

$$\mathbf{x}_d(k+i) = \mathbf{x}_r(k+i) + \hat{\mathbf{x}}_o(k) - \mathbf{x}_n(k) \quad (9)$$

extrapoliert.

Beim jeweils ersten Abtastschritt mit Daten eines neuen Sensors und am Ende der sensorregulierten Phase kann (3) zu einer unstetigen Sollbahn führen. In solchen Fällen bildet die Trajektorienplanung eine Rampe von der aktuellen zur gewünschten Sensorkorrektur.

5.4 Trajektorienglättung

Sowohl eine Rampe der Sensorkorrektur als auch (9) mit schwankenden Sensorwerten können ggf. hohe Beschleunigungen der Sollbahn ergeben. Aufgrund der engen Beschleunigungslimits des Roboters ist daher eine Glättung nötig. In [8] ist eine Glättung vorgestellt, die bei $\mathbf{E} = \mathbf{I}$ und $\mathbf{M} \neq 0$ ähnlich einer Impedanzregelung die Beschleunigungsspitzen der Sensorkorrektur verschleift:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_r) + \mathbf{D}(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}_r) + \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \ddot{\mathbf{x}}_r) = \hat{\mathbf{x}}_o - \mathbf{x}_n \quad (10)$$

Zur Erzeugung einer konsistenten Sollbahn wird \mathbf{x}_d prädiktiv berechnet. Deshalb beginnen die Positionsrampen nach Eintreffen der ersten Sensorwerte um die Prädiktionszeit verzögert.

6. Ergebnis

Beide Arten der Positionsvorsteuerung arbeiten robust, so dass nicht zwischen dem Greifen des Anbauteils (ohne Lastmasse) und dem Montieren (mit Lastmasse) unterschieden werden braucht. Die ohne Dämpfung stark angeregte Schwingung des Endeffektors tritt mit Dämpfung nicht auf (Bild 4).

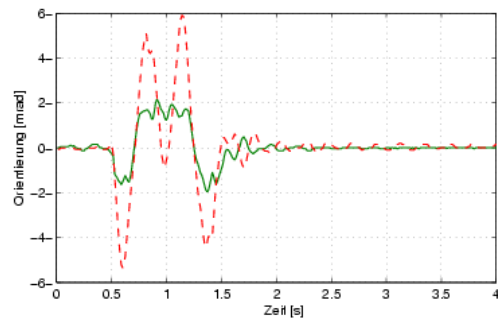
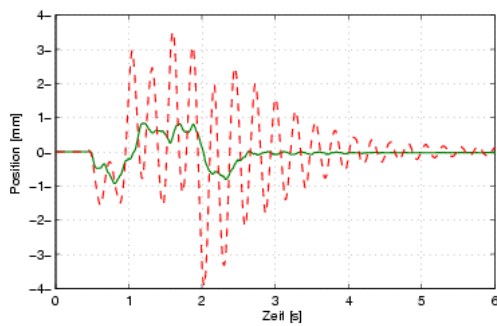


Bild 4: Einzelne Komponenten der Endeffektorauslenkung beim Abfahren einer Testbahn mit (durchgehend) und ohne (gestrichelt) Schwingungsdämpfung

Bild 5 zeigt die Regeldifferenzen bei der Radmontage nach Bild 1. Ab $t=0$ folgt der Roboter der Karosse und nähert sich kontinuierlich. Bei $t=7s$ wird der Schrauber eingeschaltet. Bei $t=10s$ ist das Rad verschraubt. Während der Annäherungsphase und während der Kontaktphase liegen die Regeldifferenzen also unter 1 mm bzw. 3 mrad. Regeldifferenzen in dieser Größenordnung sind bei der vorliegenden Aufgabe unvermeidlich. Sie bewirken eine zusätzliche Auslenkung des Kraftmomentensensors, die den zulässigen Bereich von ± 3 mm bzw. ± 3 Grad nicht überschreitet.

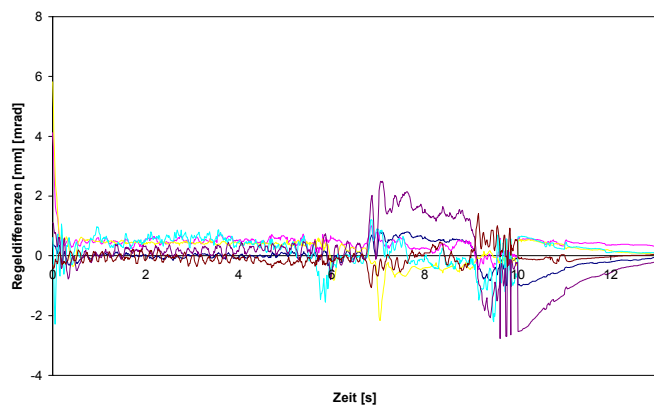


Bild 5: Regeldifferenzen der 6 Komponenten der Endeffektorlage während der Annäherung und der Montage an die Radnabe

Bild 6 vergleicht die unterschiedlichen Sensoren in Förderrichtung. Der Encoder hat eine Auflösung von 2 mm und (vor der Korrektur) einen Offset von etwa 5 mm. Die Bildverarbeitung ist im Beispiel schlecht kalibriert. Sie dominiert am Anfang die Fusion,

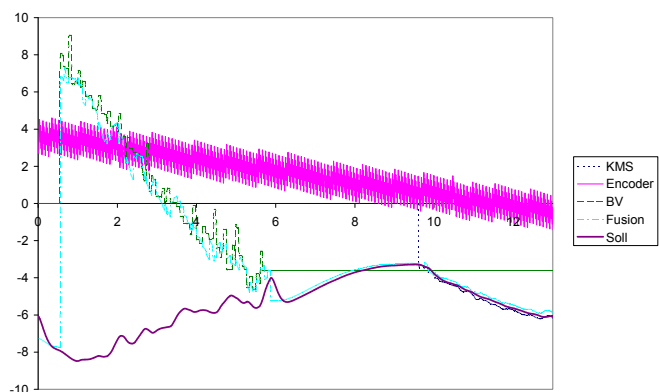


Bild 6: Sensorkorrekturen der einzelnen Sensoren, sowie fusionierte und geglättete Sollbahn

während am Ende der Kraft- Momentensensor die Sensorkorrektur bestimmt. Bei der geglätteten Solltrajektorie ist am Anfang eine Rampe zur Zielposition bei $t=6s$ überlagert.

7. Zusammenfassung

Bei dem beschriebenen Verfahren dienen Sensoren dazu, Sensorkorrekturen gegenüber einer Referenzbahn durch Vermessung des Abstands zu einem Basisobjekt zu bestimmen. Die fusionierten Sensorkorrekturen aller Sensoren werden durch Prädiktion in eine geglättete Solltrajektorie überführt, die von einem das Anbauteil tragenden Industrieroboter durch Positionsvorsteuerung und Schwingungsdämpfung hochgenau ausgeführt wird. Damit können kritische Montageaufgaben robust gelöst werden.

8. Danksagung

Die Arbeit wurde durch die Bayerische Forschungstiftung gefördert.

9. Literaturangaben

- [1] Dirndorfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage. Berlin: Springer 1993. (iwv Forschungsberichte 63).
- [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] Reinhart, G.; Werner, J.: Flexible Automation for the Assembly in Motion. Annals of the CIRP, 2007. 56(1): p. 25-28.
- [4] 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.
- [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, Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, California, Mai 2008.
- [7] Lange, F., Hirzinger, G.: Stability preserving sensor-based control for robots with positional interface, Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005), Barcelona, Spain, April 2005, Seiten 1712-1717.
- [8] Lange, F., Frommberger, M., Hirzinger, G.: Is Impedance-Based Control Suitable for Trajectory Smoothing?, 8th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO 2006), Bologna, Italy, Sept. 2006.