

## 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. Die direkte Montage während der Bewegung wird dagegen wegen der Genauigkeitsproblematik vermieden, da dazu einerseits zusätzliche Sensorik und andererseits ein leistungsfähiges Regelungskonzept erforderlich ist.

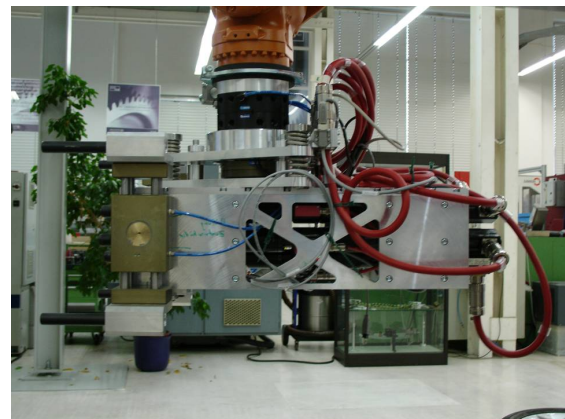


Bild 1: links: Gesamtansicht mit einem auf einer Linearachse montierten KUKA-Roboter und einer durch eine Elektro-Hängebahn transportierte Karosse;  
rechts: Detailansicht des Endeffektors mit nachgiebigem Kraft-Momenten-Sensor

Bei einer Montage in Bewegung ist die Trajektorie des Montageortes grundsätzlich unsicher, kann also nicht durch Teachen 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.

Bild 1 zeigt die Anordnung der ausgeführten Montage von Rädern an bewegte Kfz-Karosserien.

## 2. Überblick

Es wird ein Ansatz gewählt, bei dem während der gesamten Bewegung die Lage der Radnabe durch Sensoren verfolgt wird [1]. 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.

Dabei ist der Kraft- Momentensensor nachgiebig aufgebaut, um den hochfrequenten Anregungen auch passiv, also ohne Roboterbewegung nachzugeben. Dies bewirkt jedoch eine Schwingungsneigung des gesamten Endeffektors, die ausgeglichen werden muss.

## 3. Steuerung

Große Beschleunigungen treten insbesondere durch die programmierte Bahn auf. Sie werden durch Vorsteuerung der gewünschten Trajektorie im Rahmen der Stellgrößenbeschränkungen korrekt reproduziert. Das heißt, dass ein nichtkausales Vorfilter aus der Solltrajektorie  $x_d$  zu jedem Zeitpunkt geeignete Stellgrößen  $q_c$  bestimmt. Dabei wird durch die Vorsteuerung sowohl die Roboterdynamik [2] als auch die Schwingung des Endeffektors [3] berücksichtigt (siehe Bild 2).

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.

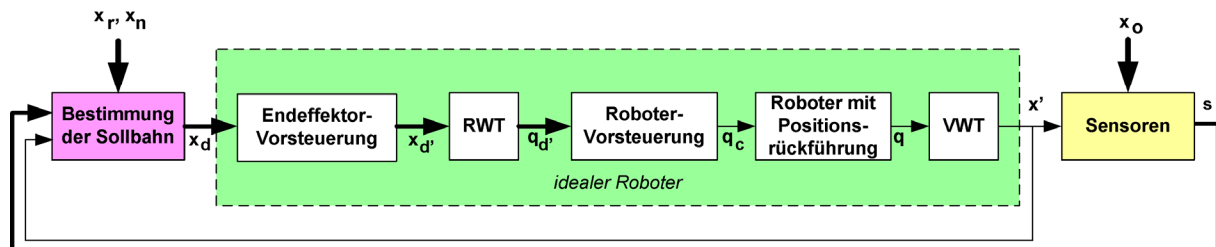


Bild 2: Blockschaftbild der Regelung (RWT und VWT bezeichnen die kinematische Rückwärts- und Vorwärtstransformation)

#### 4. 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 Förderereinrichtung 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.

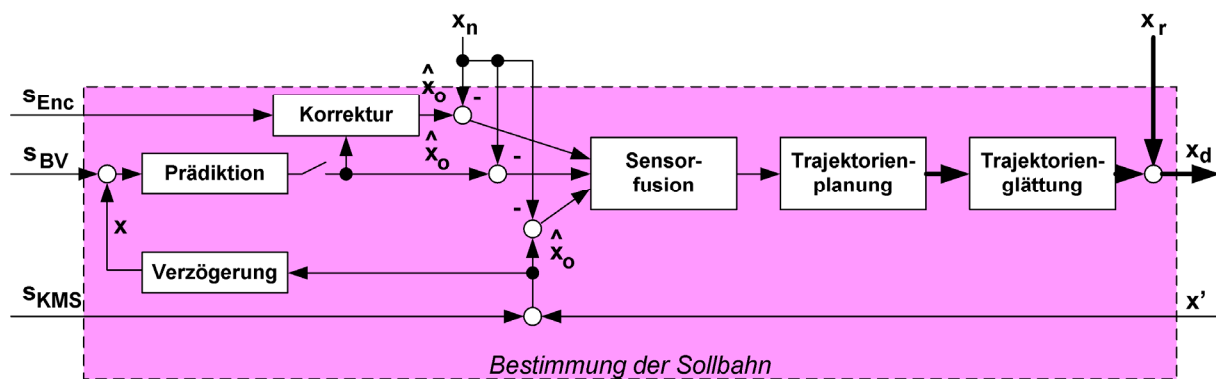


Bild 3: Blockschaftbild der Bestimmung der Sollbahn

Die Sensorkorrekturen werden durch die von den einzelnen Sensoren gemessenen Objektpositionen  $\hat{x}_o(k)$  und die nominellen Objektpositionen  $x_n(k)$  des Basisbauteils bestimmt (Bild 3). 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. Dabei können auch ggf. bekannte Schwingungsgleichungen der Karosse berücksichtigt werden.

## 5. 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 zeigt die Regeldifferenzen während der Annäherungsphase und während der Kontaktphase bei der Radmontage nach Bild 1. Regeldifferenzen in dieser Größenordnung sind bei der vorliegenden Aufgabe unvermeidlich. Sie bewirken eine zusätzliche Auslenkung des Kraft-Momentensensors, die den zulässigen Bereich von  $\pm 3$  mm bzw.  $\pm 3$  Grad nicht überschreitet.

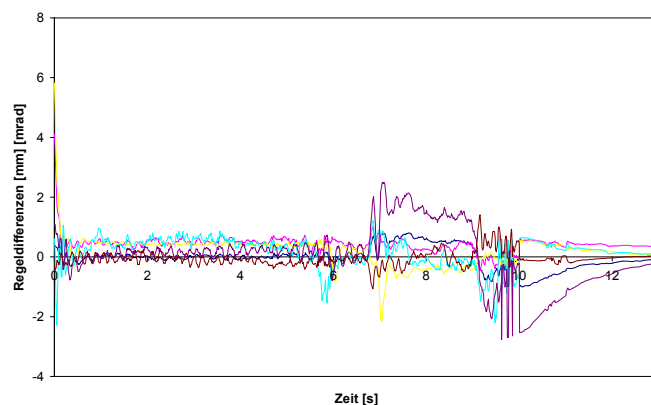


Bild 4: Regeldifferenzen der 6 Komponenten der Endeffektorlage während der Annäherung und der Montage an die Radnabe

## 6. Zusammenfassung

Durch sensorgestützte Ermittlung und Prädiktion der Solltrajektorie und Vorsteuerung zur Kompensation der Dynamik können kritische Montageaufgaben robust gelöst werden.

## Literaturverzeichnis

- [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., Hirzinger, G.: Learning of a Controller for Non-Recurring Fast Movements. Advanced Robotics, 1996
- [3] 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.