

**Kognitionsorientierter modularer und autonomer Service-Roboter
zur vor-Ort-Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeu-
gen in wechselnden Kontexten
(KomoRob)**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wilden
Dr.-Ing. J.P. Bergmann (Koordinator)
Fachgebiet Fertigungstechnik,
Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau
Tel.: +49 3677 692980 Fax: +49 3677 691660
Neuhaus 1, 98693 Ilmenau

Kurzfassung

Die Robotik stellt eine Schlüsseltechnologie für eine wirtschaftliche, marktorientierte und flexible Fertigung dar, auch wenn Robotersysteme für den industriellen Einsatz in der Fertigung zum Teil immer noch wie vor zwanzig Jahren als „freiprogrammierbare Handhabungsautomaten“ verstanden werden. Die Integration in laufende Prozesse von intelligenten, kognitionsorientierten und roboterbasierten Systemen könnte zum Erschließen von neuen Märkten, aber auch zum Sichern und Ausbauen bestehender Märkte führen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung kognitionsorientierter, modularer und autonomer Service-Roboter zur Vor-Ort-Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen in wechselnden Kontexten. Grundlage hierfür ist die enge Verknüpfung von Robotik mit Sensorik zum autonomen Erfassen der Arbeitsumgebung und der aktuellen Werkzeuggeometrie, zur kognitionsorientierten Festlegung von Instandsetzungsstrategien. Darüber hinaus spielen die Prozesstechnik zur Instandsetzung und deren Integration in die Anwendung eine hervorgehobene Stellung. Der portable Aufbau des Gesamtsystems gewährleistet durch die Möglichkeit zum Vor-Ort-Einsatz ein Höchstmaß an Flexibilität sowie technologischer und ökonomischer Wettbewerbsfähigkeit.

Das Alleinstellungsmerkmal dieses Ansatzes liegt darin, dass es erstmalig mit der vorgesehenen Entwicklung möglich wird, einen portablen Roboter autonom zum hochgenauen Vermessen von großen Werkzeugen und deren Instandsetzung durch Auftragschweißverfahren einzusetzen.

1. Einleitung und Vorstellung des Themenkomplexes

Die Robotik ist eine Schlüsseltechnologie für eine wirtschaftliche, marktorientierte und flexible Fertigung. Die Integration in laufende Prozesse von intelligenten, kognitionsorientierten und roboterbasierten Systemen könnte zum Erschließen von neuen Märkten, aber auch zum Sichern und Ausbauen bestehender Märkte führen. Auf Grund der Entwicklungen in den Assistenz- und Service-Bereichen nimmt die Robotik eine herausragende Stellung als Wachstumstreiber innovativer Märkte ein, wobei noch ein erheblicher Bedarf an Forschungsarbeiten besteht, bis vielseitig verwendbare Serviceroboter für verschiedene Alltagsaufgaben einer breiten Anwendungspalette zur Verfügung stehen.

Ständig steigende Ansprüche an Produktdesign, Komplexität und technische Reife bei gleichzeitig immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und eine zunehmende Variantenvielfalt stellen höhere Anforderungen an den Werkzeug- und Formenbau. Die Endkontur von Formen und Werkzeugen für Blechumformung und Spritzguss wird auch heute immer noch per Hand hergestellt. Hierzu bringt der Werkzeugmacher seinen umfangreichen persönlichen Erfahrungsschatz ein.

Die Herstellungskette eines Umformwerkzeuges kann sehr langwierig und dementsprechend kostenintensiv sein. Nach dem ersten Tiefziehvorgang wird das Bauteil vermessen und die Toleranzen bewertet. Aus dem Soll/Ist-Vergleich am Bauteil werden dann die Bereiche des Werkzeuges festgelegt, an denen geometrische Änderungen erfolgen müssen. Die Form wird aus der Presse gefahren und die markierten Bereiche werden dann bei Untermaß durch Auftragschweißen bearbeitet. Die aufzutragende Schicht, die in diesem besonderen Fall artgleich ist, beträgt in der Regel 0,1 bis 0,5 mm. Die Handhabung der Form (bis zu 30 t) gestaltet sich auf Grund des hohen Gewichtes als sehr schwierig, so dass das Auftragen in Wannennlage nicht immer möglich ist. Das Handauftragschweißen erfolgt daher in unterschiedlichen Positionen und ist durch eine deutlich höhere Dicke und eine ausgeprägt unregelmäßige Oberfläche gekennzeichnet. Daher werden die bearbeiteten Bereiche nach dem Auftragschweißen spanend bearbeitet, was mit weiteren Kosten und Liegezeiten verbunden ist. Diese Vorgehensweise führt sowohl bei der Produktion als auch bei der Instandsetzung zu einem hohen Aufwand und langen Durchlaufzeiten.

Daraus ergibt sich das Ziel des Forschungsvorhabens, einen kognitionsorientierten, modularen und autonomen Service-Roboter zur Vor-Ort-Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen in wechselnden Kontexten zu entwickeln. Grundlage hierfür ist die enge Verknüpfung von Robotik mit Sensorik zum autonomen Erfassen der Arbeitsumgebung und der aktuellen Werkzeuggeometrie, zur kognitionsorientierten Festlegung von Instandsetzungsstrategien. Darüber hinaus spielen die Prozesstechnik zur Instandsetzung und deren Integration in die Anwendung eine hervorgehobene Stellung. Das Alleinstellungsmerkmal liegt darin, dass es erstmalig mit der vorgesehenen Entwicklung möglich wird, einen portablen Roboter autonom zum hochgenauen Vermessen von großen Werkzeugen und deren Instandsetzung durch Auftragschweißverfahren einzusetzen.

Die geringe notwendige Dicke der Auftragung stellt hohe Genauigkeitsanforderungen einerseits an die Vermessung, aber andererseits an die exakte Positionierung im Raum des Roboters sowohl beim Vermessen als auch beim Ausführen. Aktuelle Knickarm-Industrierobotersysteme können diesen Anforderungen nicht gerecht werden, da die Genauigkeit zwischen 0,1 und 0,5 mm vergleichbar zum aufzutragenden Bereich ist. Die Entwicklung einerseits einer sensorintegrierten Methodik zur präziseren Bestimmung der Roboterposition und andererseits eine hochdynamische Erfassung der Formgeometrie ist unerlässlich. Um hier Abhilfe zu schaffen, wird im Roboter eine antriebsunabhängige Messsensorik integriert, die in einem Regelkreis in Echtzeit die Position des Roboters ermittelt und Korrekturen vornimmt (*Dynamische Umgebungserfassung*). Tiefzieh- und Spritzgießwerkzeuge verfügen über feste Referenzpunkte, die vom Roboter für die Referenzierung bei wechselnder Aufgabe wahrgenommen werden können. Dadurch wird es möglich sein, den Roboter als mobiles Mess- und Bearbeitungssystem einzusetzen und Aufgaben vor Ort (z.B. im Presswerk) durchzuführen.

Das Vermessen und Auftragschweißen erfolgt in einem Arbeitsgang. Durch die Streifenmethodik können großräumige Bauteile 3-D mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Durch Überlappung verschiedener Aufnahmen können auch komplizierte Konturen wiedergeben werden. Bei größeren Werkzeugen (z.B. Seitenwände von PKW) erweist sich die Modularität des Systems als besonders vorteilhaft, da dieser an unterschiedlichen Stellen positioniert werden kann.

Das entwickelte System wird dann durch Patchworking die Gesamtform des Werkzeuges reproduzieren. Durch eine spezifische Handlungslogik wird der Roboter in die Lage versetzt eigenständig die Strategie zur Prozessführung beim Auftragschweißen festzulegen. Dieser Zustand wird aus einer Lernphase entstehen, bei dem evolutionär die vom Roboter ausgewählten Strategien durch erfahrenes Bedienpersonal überprüft und ggf. korrigiert werden. Auch Werkzeugkavitäten werden in diesem Schritt Rechnung getragen.

Als Auftragschweißverfahren kommen wärmearme Verfahren wie das Plasma-, Laserauftragschweißen oder neuartige Lichtbogenauftragschweißverfahren mit innovativen Stromquellen zum Einsatz. Insbesondere das Plasma-Pulver-Auftragschweißen erscheint für die gegebene Aufgabenstellung auf Grund der metallurgischen Randbedingungen besonders geeignet. Hierfür gilt es, das Prozessfeld zum endkonturnahen automatisierten Freiformflächenbeschichten zu parametrisieren. Eine eventuelle Nachbearbeitung kann durch ein kleinvolumiges Schleifgerät durchgeführt werden.

Der abzutragende Bereich kann mittels der optischen Messtechnik (Streifenmethode) ermittelt werden und vergleichbar zum Auftragschweißen kann das abzutragende Volumen ermittelt und definiert werden. Eine Überprüfung kann nach der Bearbeitung wieder mit der vorhandenen Messtechnik erfolgen.

2. Projektstatus

Die Arbeiten haben zum 1. April 2006 begonnen und haben sich in der ersten Phase intensiv mit der Grundproblematik der Verbesserung der Absolutpositionierung des Roboters zum Vermessen

und Nachbearbeiten der aufgetragenen Schichten befasst. Dazu wird im folgenden Beitrag berichtet.

3. Ausblick

Das volkswirtschaftliche Potenzial eines Serviceroboters für das Instandsetzen und Reparieren von Werkzeugen ist beachtlich. Zahlreiche Firmen sehen derzeit aufgrund mangelnder Erfahrung und Reparaturmöglichkeiten keine Chance verschlissene oder unbrauchbare Werkzeuge zu reparieren. Durch die Bereitstellung eines kognitionsorientierten Serviceroboters würde ihnen ein effektives und vielseitiges Werkzeug an die Hand gegeben, welche ihnen eine Weiternutzung der Werkzeuge erlaubt und Vorteile in wirtschaftlicher und wettbewerbstechnischer Hinsicht mit sich bringt.

Eine Übertragung von Teilergebnissen ist in vielen Bereichen möglich.

4. Projektpartner

Arthur Bräuer GmbH & Co. KG, 57399 Kirchhudem-Würdinghausen

ICOM Automation GmbH, 98693 Ilmenau

AOS GmbH, 01067 Dresden

Heinz Schwarz GmbH & Co. KG, 32361 Preußisch Oldendorf

Rui Barradas, 44149 Dortmund

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik, 98693 Ilmenau

Reis GmbH & Co. Maschinenfabrik, 63785 Obernburg

Universität Dortmund, Lehrstuhl Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund

Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik GmbH, 28359 Bremen

DURUM GmbH, 47877 Willich

Verbesserung der Absolutpositionierung von Servicerobotern

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. T. Bertram, Dipl.-Ing. R. Franke, Dr. rer. nat. F. Hoffmann,
Dipl.-Inf. M. Ruderman, Dipl.-Ing. M. Sterneke
Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Dortmund
Tel.: +49 231 755 2761 Fax: +49 231 755 2752
Otto-Hahn-Straße 4, 44221 Dortmund

Kurzfassung

In der modernen Robotik finden sich verstärkt Aufgabenstellungen, die eine sehr hohe Präzision bei der Handhabung erfordern. Trotz einer relativ hohen nominellen Wiederholgenauigkeit heutiger Roboter unterliegen die tatsächlich erzielbaren Genauigkeiten starken Variationen. Neben Fertigungstoleranzen, die durch eine entsprechende Roboterkalibrierung kompensiert werden können, liegen weitere mögliche Fehlerquellen in der nichtlinearen Transmission in den Roboterjunkten und in der elastischen Deformation einzelner Roboterkörper in Abhängigkeit von der Roboterkonfiguration und äußeren Einflussgrößen wie Traglast und Temperatur. Dieser Beitrag stellt mögliche Vorgehensweisen zur statischen Fehlerkompensation mit dem Ziel einer verbesserten Absolutpositionierung vor. Dabei wird zum einen der Einsatz eines externen Sensornetzwerkes, basierend auf Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren und hochpräzisen Winkeldrehgebern, untersucht. Zum anderen wird die modellbasierte Ermittlung der resultierenden Positionsfehler einzelner Achsen innerhalb der kinematischen Kette des Roboters diskutiert.

1. Einleitung und Vorstellung des Themenkomplexes

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02PB2197 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

In diesem Beitrag werden Ansätze und Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes *KomoRob* (Förderkennzeichen 02PB2197) erarbeitet wurden beziehungsweise Gegenstand aktueller Arbeiten sind. Ziel des Verbundprojektes ist es, einen kognitionsorientierten modularen und autonomen Serviceroboter zur Vor-Ort-Instandsetzung von Tiefzieh- und Spritzgusswerkzeugen in wechselnden Kontexten zu entwickeln. Im Hinblick auf die exakte Positionierung des Roboters besteht in dieser Anwendung die zusätzliche Schwierigkeit, dass der Roboter für die Bearbeitung großer Werkstücke mehrfach umgesetzt werden muss. Die manuelle Instandsetzung solcher Werkzeuge ist bisher mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Durch den Einsatz eines Serviceroboters wird eine wirtschaftlichere Lösung ange-

strebt, die insbesondere klein- und mittelständischen Unternehmen zu einer besseren Wettbewerbssituation gegenüber beispielsweise so genannten Niedriglohnländern verhelfen soll.

2. Projektstatus

Im Folgenden werden die vom Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik der Universität Dortmund in der bisherigen Projektlaufzeit (Start 1. April 2006) durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse zur Verbesserung der Absolutpositionierung vorgestellt.

3. Erfahrungen, Bewertungen

Einleitung

In der Robotik kommt der Identifikation der kinematischen und dynamischen Parameter und den darauf aufbauenden Fehlerkorrekturen eine große Bedeutung zu. Ziel dabei ist es, die Positioniergenauigkeit immer weiter zu verbessern. Massive und dadurch weitestgehend steife Roboter kommen in der Service-Robotik sowie in der Medizintechnik bei Anwendungen zum Einsatz, die eine hohe Präzision im Sinne der Positionierung erfordern. Beispiele hierfür sind die Inspektion von Stromgeneratoren in Atomkraftwerken [1] und die Positionierung von Patienten bei der Untersuchung und Behandlung von Krebserkrankungen [2]. Eine zunehmende Tendenz, die sich in der Servicerobotik insbesondere bei der Wechselwirkung des Roboters mit dem Menschen abzeichnet, ist der Übergang zu Leichtbaumanipulatoren, die deutliche Vorteile im Hinblick auf Herstellungskosten und Arbeitssicherheit haben. Die angestrebte Leichtbaukonstruktion führt aber zwangsläufig zum Auftreten erhöhter Elastizitäten und damit zu erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit.

Fehlstellungen werden durch drei prinzipielle Fehlerquellen verursacht. Dies sind zum einen Fertigungstoleranzen und zum anderen Verformungen der Roboterkörper sowie Transmissionsfehler in den Roboterjunkten. Den Fertigungstoleranzen kann durch eine Kalibrierung des Roboters vor dem Einsatz begegnet werden. Während die Verformungen des Roboterkörpers durch ausgereifte modellbasierte Ansätze zur Parameteridentifikation des kinematischen Modells [3, 4, 5] identifiziert und kompensiert werden können, gibt es für die letzt genannten Fehlerquellen bisher nur weit weniger ausgereifte Modelle und Ansätze.

Systemintegriertes Sensornetzwerk

In gängigen Robotersystemen werden die Achsstellungen durch die antriebsseitig integrierten Sensoren (Winkeldrehgeber) erfasst, beziehungsweise mit Hilfe der Antriebsansteuerung bestimmt. Bedingt durch verschiedene nichtlineare Effekte in den Roboterjunkten weichen die tatsächlichen Achsstellungen aber von den durch die Sensoren gemessenen Werten ab, wodurch sich ein Positionierungsfehler des Endeffektors ergibt. Für eine genauere Erfassung der Positionsabweichungen einzelner Roboterachsen soll hier ein externes Sensornetzwerk verwendet werden. Dieses umfasst hochpräzise Winkeldrehgeber und Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren. Die mit dem Sensornetzwerk ermittelten Messwerte werden für eine Online-Fehlerkompensation während des Roboterbetriebs in der Anwendung oder für die Identifikation entsprechender Fehlermodelle während des Roboterbetriebs in der Forschung und Entwicklung verwendet.

Der Einsatz von hochpräzisen Winkeldrehgebern auf der Abtriebsseite erlaubt eine antriebsunabhängige Erfassung der Achsstellungen. Durch den Vergleich mit den systeminternen Werten aus der Robotersteuerung werden die Achsfehlstellungen ermittelt. Hierfür werden so genannte „virtuelle“ Absolutdrehgeber mit einer Auflösung von 20 Bit pro Rotation und einer nominellen Ge-

naugigkeit von 15 Bogensekunden der Firma Gurley Precision Instruments eingesetzt. Zur Erfassung der an einzelnen Roboterkörpern auftretenden Verformungen (Durchbiegungen und Torsionen) kommen FBG-Sensoren [6] zum Einsatz. Diese können durch Verkleben direkt am Roboter appliziert werden, sodass der Arbeitsraum des Roboters hierdurch nicht zusätzlich eingeschränkt wird. Derzeit kommerziell verfügbare FBG-Sensoren erzielen eine Genauigkeit im Bereich einiger $\mu\text{m/m}$ Dehnung in axialer Richtung bei einer Auflösung von ca. $1 \mu\text{m/m}$.

Um die Elastizitäten erweitertes kinematisches Modell eines Roboters

In der Robotik dient ein kinematisches Modell unter anderem auch zur Beschreibung der Lage des Endeffektors (Tool-Center-Point TCP). Die kinematische Kette eines Roboters wird dabei durch eine mathematische Beschreibung der Position und Orientierung jedes Gelenks relativ zu dem vorhergehenden Gelenk dargestellt. Für die Spezifikation der körperfesten Koordinatensysteme einer kinematischen Kette werden häufig die achsbezogenen Denavit-Hartenberg (DH) Parameter [7] eingesetzt, die sich in einer homogenen 4×4 Transformationsmatrix ${}^{i-1}T_i$ zusammenfassen lassen. Die Transformation, die das Koordinatensystem des TCPs über die einzelnen Koordinatensysteme der Achsen relativ zur Roboterbasis wiedergibt, wird so wie folgt beschrieben:

$${}^0T_{TCP} = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^nT_{TCP} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Dabei ist $R_{3 \times 3}$ die Rotationsmatrix und $P_{3 \times 1}$ der Positionsvektor des TCP-Koordinatensystems bezogen auf das Basiskoordinatensystem. Die nominellen DH-Parameter definieren das kinematische Modell eines Roboters vollständig, jedoch ohne Berücksichtigung der auftretenden geometrischen und elastischen Fehler. Diese Fehler werden in einer homogenen Fehlermatrix E_i [8] zusammengefasst, die den Offset zwischen dem nominellen und dem realen Koordinatensystem der i -ten Achse darstellt. Die Gesamttransformation der kinematischen Kette unter Einbeziehung der entstehenden Fehler lässt sich damit wie folgt schreiben:

$${}^0T_{TCP} = {}^0T_1 E_1 {}^1T_2 E_2 \dots {}^nT_{TCP} E_{TCP}. \quad (2)$$

Zur Nachbildung der Roboterbewegungen wird eine Simulation eines 6-achsigen Industrieroboters entwickelt, die mit der Einbettung von MATLAB® Real-Time-Workshop und Virtual Reality Modeling Language (VRML) die Kinematik des Roboters errechnet und dessen Bewegungen, wie in Abbildung 1 dargestellt, wiedergibt.

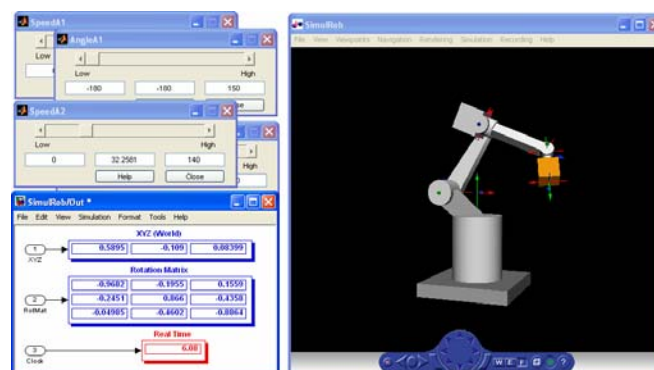


Abbildung 1: Virtuelle Simulation einer Roboterkinematik

Nichtlinearitäten der Roboter Gelenke und konfigurationsabhängige Lastwirkungen

Eine exakte Modellierung der Transmission mit den antriebsseitig geregelten Achsstellungen beziehungsweise Antriebsmomenten ist für eine genaue Positionierung einzelner Roboterachsen von großer Bedeutung. Diese wird allerdings durch das Auftreten von nicht eindeutig identifizierbaren und zudem stark verkoppelten nichtlinearen Effekten wie Elastizität, Haft- und Gleitreibung der Getriebe sowie durch den Totgang der Achsen erschwert. Als Konsequenz des Zusammenwirkens treten im statischen Fall sowie in allen Phasen der Roboterbewegung variierende Achsfehlstellungen auf. Bei niedrigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Achsen und insbesondere an den Rand- sowie Sättigungspunkten der Bewegungsprofile lassen sich die Trägheits-, Coriolis- und Zentrifugalmomente bei der Betrachtung der Roboterbewegung vernachlässigen. Das so vereinfachte Bewegungsmodell [9] berücksichtigt dann die Gravitations-, Elastizitäts- und Reibungskomponenten neben den antriebsseitig wirkenden Drehmomenten.

In Abhängigkeit von der Roboterkonfiguration und der Traglast am Endeffektor ändern sich die Gravitationsmomente, die an den einzelnen Roboterachsen angreifen und eine entsprechende Gelenktorsion hervorrufen. Hier wird der Roboter als eine offene kinematische Kette betrachtet, daher tragen alle mechanischen Nachfolgeelemente in Richtung des Endeffektors zu dem an der jeweiligen Achse entstehenden Gravitationsdrehmoment bei. Die Einzelelemente der kinematischen Kette werden dabei durch ihre Massenschwerpunkte in homogenen körperfesten Koordinaten repräsentiert. Für die Analyse der möglichen Gravitationsmomente bei der Bewegung des Roboters über einen größeren Arbeitsbereich wurde das kinematische Modell eines 6-achsigen Knickarmroboters mit maximaler Traglast und der Gesamtlänge des voll ausgestreckten Arms verwendet.

Das Reibungsverhalten wird hauptsächlich in zwei Fälle unterteilt: *Presliding Regime* und *Sliding Regime* [10]. Im *Presliding Regime*, das heißt für geringfügige Bewegungen (Mikrobewegungen), ist die Reibungskraft als positionsabhängige Hysterese-Funktion zu modellieren. Für die Makrobewegungen des Systems, das heißt im *Sliding Regime*, stellt die Reibungskraft eine nicht-lineare Funktion der Geschwindigkeit dar. Während die meisten dynamischen Reibungsmodelle auf den nicht direkt messbaren und schwer identifizierbaren inneren Zustandsgrößen basieren, bietet sich ein statisches Stribeck-Modell zur Beschreibung des Reibungsverhaltens im *Sliding Regime* an. Das Stribeck-Modell beruht auf der Annahme, dass die Reibungskraft beim Gleiten geschwindigkeitsabhängig ist und neben dem viskosen auch konstante (coulombsche) und statische Reibungsterme beinhaltet. Für die Identifikation der Modellparameter werden verschiedene konstante Geschwindigkeitsprofile abgefahren, sodass die Trägheitsmomente des Systems vernachlässigt werden können. Nach der Eliminierung entsprechender Gravitations- und Elastizitätsterme wird das resultierende Reibungsmoment dem resultierenden Drehmoment der Antriebe gleichgesetzt. Mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsanalyse werden dann die Modellparameter aus den Verlaufsdaten bestimmt.

Berücksichtigung der auftretenden Deformationen der Roboter Körper

Zur grundsätzlichen Erhöhung der Absolutpositioniergenauigkeit eines Knickarmroboters ist es vorteilhaft, die auftretenden Verformungen der Roboter Körper bei der Positionierung des Endeffektors zu berücksichtigen.

Zur Messung der auftretenden Biegungen und Torsionen sollen FBG-Sensoren eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um intrinsische faseroptische Sensoren, die mithilfe eines UV-Lasers in den Kernbereich einer Glasfaser eingeschrieben werden. Durch diesen Prozess entsteht in der Faser quer zur Ausbreitungsrichtung des Lichts eine periodische oder aperiodische Brechzahlstruktur. Hieraus ergibt sich die Eigenschaft eines FBGs, Licht einer bestimmten Wellenlänge

(Braggwellenlänge) zu reflektieren. Da sich die Braggwellenlänge mit einer Änderung der Temperatur und/oder einer mechanischen Dehnung am Gitterort ändert, können diese Größen somit ortsauflösend gemessen werden.

Die meisten Modelle zur Deformationsberechnung basieren auf der Annahme, dass sich der Körper nur innerhalb des linear elastischen Bereichs verformt. In diesem Fall ist der Körper nach dem Entfernen aller äußeren Kräfte wieder verzerrungsfrei und nimmt seinen ursprünglichen Zustand an. Für diesen Fall gilt das Hookesche Gesetz, das den Zusammenhang zwischen der Spannung, der Dehnung und dem materialabhängigen Elastizitätsmodul beschreibt. Da in diesem Projekt ein massiver Roboter zum Einsatz kommt, darf angenommen werden, dass ausschließlich Verformungen innerhalb des linear elastischen Bereichs auftreten, die zudem klein gegenüber den Abmessungen der Roboterkörper sind.

Zunächst wurden für einfache mechanische Körper, beispielsweise Rechteckprofile, Biegebeanspruchungen innerhalb des linear elastischen Bereichs simuliert. Die Modelle basieren dabei auf den Euler-Bernoulli Annahmen der Elastizitätstheorie und sind so konzipiert, dass sich die Querschnitte und das Elastizitätsmodul über den betrachteten Körper ändern können. Zur Verifikation der Modelle ist ein Laborprüfstand (Abbildung 2) aufgebaut worden, in dem mithilfe einer digitalen Messuhr die durch eine Gewichtsbelastung hervorgerufene Durchbiegung eines Körpers an verschiedenen Stützstellen gemessen und mit den simulativ berechneten Werten verglichen wird (Abbildung 3).

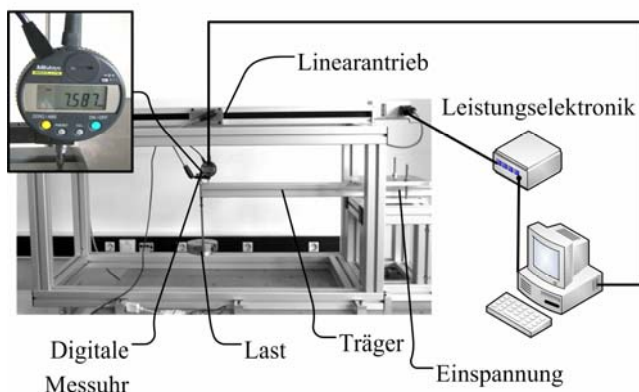


Abbildung 2: Laborprüfstand für die Verifikation und Validierung der Verformungsmodelle

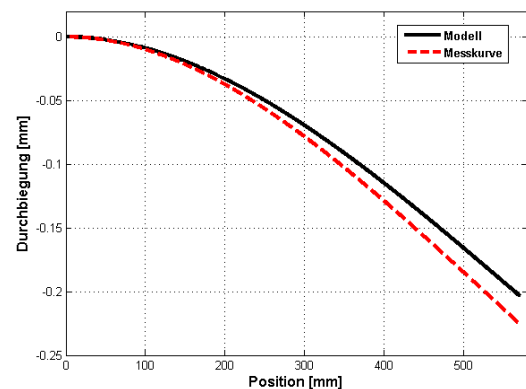


Abbildung 3: Vergleich einer simulierten mit einer gemessenen Biegelinie

In aktuell anstehenden Arbeiten werden die untersuchten Körper mit entsprechenden FBG-Sensoren ausgestattet und die Dehnungslinie so an verschiedenen Stützstellen gemessen. Aus den Dehnungsmesswerten wird dann die Biegelinie rekonstruiert und ebenfalls mit den Simulationsergebnissen verglichen. Diese Untersuchungen dienen unter anderem auch dazu, Erfahrungen zu sammeln, wie die FBG-Sensoren auf den Körpern zu applizieren sind, um die mechanischen Belastungen (Biegung und Torsion) unter Berücksichtigung der Temperaturkompensation eindeutig zu bestimmen. Daneben hat die Qualität der Verklebung der FBG-Sensoren mit dem Körper einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Messung. Diese Vorarbeiten dienen somit auch dazu, den späteren Transfer der Sensorik auf das Roboterzielsystem möglichst gut vorzubereiten. Bei dem späteren Einsatz der FBG-Sensoren am Roboterzielsystem ist auch zu bedenken, dass die Roboterkörper komplexer gestaltet sind als beispielsweise ein einfaches Rechteckprofil. Es

wird daher nicht nur von großer Bedeutung sein, die FBG-Sensoren kraftschlüssig zu verkleben, sondern diese auch möglichst günstig entlang eines Körpers zu platzieren, um die auftretenden Verformungen erfassen zu können. Eine möglichst optimale Sensortopologie soll dabei modellbasiert ermittelt werden, da systematische Untersuchungen am realen System mit entsprechendem Aufwand verbunden sind. Auch hierfür sind vorbereitende Untersuchungen durchgeführt worden. Anhand der oben erwähnten Verformungsmodelle für vergleichsweise einfache mechanische Körper wurden die Dehnungswerte an verschiedenen Stützstellen eines Körpers bestimmt und daraus die Dehnungslinie rekonstruiert. Die Stützstellen entsprechen den späteren Positionen der FBG-Sensoren auf einem Körper. Die Anzahl der FBG-Sensoren wird in der Praxis später stark begrenzt sein, da nicht beliebig viele FBG in eine Faser eingebracht werden können und aus Kostengründen auch nicht eingebracht werden sollen. Die Qualität der Rekonstruktion hängt daher von der Wahl der Stützstellen ab. Für verschiedene Körper, deren Werkstoffeigenschaften und Querschnitte sich über die Körperlänge ändern, sind mithilfe eines evolutionären Algorithmus [11] anhand der Modelle solche Optimierungen der Sensorenanordnungen bereits erfolgreich durchgeführt worden. Diese Vorgehensweise soll später auch für die Optimierung der Sensorenanordnung auf dem Roboter eingesetzt werden. Hierzu müssten die komplexen Roboterkörper dann gegebenenfalls durch einfachere Ersatzkörper angenähert werden. Bessere Ergebnisse lassen sich allerdings erzielen, wenn exaktere Modelle der Roboterkörper verwendet werden, beispielsweise Finite-Elemente-Modelle. Die Optimierung der Sensortopologie anhand von Finite-Elemente-Modellen soll in Zukunft zunächst für einfachere Körper erprobt werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In unterschiedlichen praktischen Anwendungen stellt sich die Aufgabe, einen Roboter hochgenau zu positionieren. Die geforderte Genauigkeit kann aufgrund der unter Lasteinwirkung auftretenden Deformationen der Roboterkörper und der Nichtlinearitäten in den Antrieben sowie Gelenken durch die roboterinterne Sensorik aber unter Umständen nicht erreicht werden. In diesem Beitrag wird der Aufbau eines systemintegrierten Sensornetzwerkes beschrieben. Dieses kann entweder dauerhaft auf einem Roboter appliziert und für eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit genutzt werden oder aber nur temporär angebracht und für die Identifikation entsprechender Fehlermodelle eingesetzt werden. Im letzteren Fall werden im praktischen Einsatz des Roboters dann die Fehlermodelle zur Kompensation verwendet, um eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit zu erreichen. Die Parameteridentifikation für die Modelle muss vermutlich in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt werden, um Veränderungen am Roboter, die sich durch Abnutzung ergeben, Rechnung zu tragen, dies ist jedoch noch durch eine anschließende Sensitivitätsanalyse der zu entwickelnden Fehlermodelle systematisch zu verifizieren. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Vermeidung hoher Kosten für die dauerhafte Anschaffung der Sensorik.

Die vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes *KomoRob* (Förderkennzeichen 02PB2197) durchgeführt. Die beschriebenen Ansätze sind aber auch auf Anschlussprojekte übertragbar. Insbesondere die hochgenaue Positionierung von Leichtbaumanipulatoren ist ein denkbares und interessantes weiterführendes Themengebiet im Kontext der Servicerobotik, das zudem eine wachsende wirtschaftliche Bedeutung besitzt. Aufgrund der Bauart solcher Leichtbaumanipulatoren wirken sich dort Nichtlinearitäten der Robotergelenke und Deformationen der Roboterkörper wesentlich stärker aus als bei massiven steifen Robotersystemen.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung der Arbeiten.

Literaturangaben

- [1] Meggiolaro, M. A., Dubowsky, S.: Improving the positioning accuracy of powerful manipulators with application in nuclear maintenance. Proceedings of the 16th Brazilian Congress in Mechanical Engineering (COBEM), Brazil, Vol. 15, 2001, pp. 210-219
- [2] Flanz, J et al.: Design Approach for a Highly Accurate Patient Positioning System for NPTC. Proceedings of the PTOOG XXV and Hadrontherapy Symposium, Belgium, 1996, pp. 1-5
- [3] Hollerbach, J., Wampler, C.: The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods. International Journal of Robotics Research 15 (6), 1996, pp. 573-591
- [4] Roth, Z., Mooring, B., Ravani, B.: An overview of robot calibration. IEEE Transactions on Robotics and Automation 3 (5), 1987, pp. 377-385
- [5] Drouet, S., Dubowsky, S., Zegloul, C., Mavroidis: Compensation of geometric and elastic errors in large manipulators with an application to a high accuracy medical system, Robotica 2, 2002, pp. 341-352
- [6] Tahir, B. A., Ali, J., Rahman, R.A.: Strain Measurements Using Fibre Bragg Grating Sensor. American Journal of Applied Science, 2005, pp. 40-48
- [7] Denavit, J., Hartenberg, R.: A Kinematic Notation for Lower-pair Mechanisms Based on Metrics. ASME J. of Applied Mechanics 22, 1955, pp. 215-221
- [8] Meggiolaro, M., Dubowsky, S., Mavroidis, C.: Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system. Mechanism and Machine Theory 40, 2005, pp. 415-427
- [9] Kennedy, C., Desai, J.: Estimation and Modeling of the Harmonic Drive Transmission in the Mitsubishi PA-10 Robot Arm. IEEE/RSJ IROS, 2003
- [10] Lampaert, V., Swevers, J., Al-Bender, F.: Experimental comparison of different friction models for accurate low-velocity tracking. Proceedings of the 10th Mediterranean conference on control and Automation - MED2002, Portugal, 2002
- [11] Schwefel, H.: Evolution and Optimum Seeking. John Wiley & Sons, 1995