

Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik

der Universität Karlsruhe (Technische Hochschule)

vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Friedrich Lange

aus Kassel

Tag der mündlichen Prüfung 3. Februar 2003

Erster Gutachter Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann

Zweiter Gutachter Prof. Dr.-Ing. G. Hirzinger

Übersicht

Herkömmliche Robotersteuerungen, wie sie in der industriellen Fertigung eingesetzt werden, bewirken bei hohen Geschwindigkeiten teilweise erhebliche Bahnabweichungen der Werkzeugspitze, sodass bei kritischen Aufgabenstellungen, die hohe Bahngenauigkeit erfordern, eine Anpassung des Steuerungsprogramms erforderlich wird. In der Regel müssen die überwiegend offline programmierten Bahnen manuell angepasst werden, sofern die Geschwindigkeit des Industrieroboters nicht reduziert werden soll. Diese Fragestellung wird in dieser Arbeit qualitativ und quantitativ untersucht.

Leistungsfähige adaptive Algorithmen zur Kompensation der Bahnabweichungen bei schnellen Roboterbewegungen sind weder im industriellen Bereich noch im wissenschaftlichen Umfeld direkt verfügbar. Gleichzeitig besteht aber ein großer Bedarf, offline programmierte Aufgaben für Industrieroboter sofort fehlerfrei ausführen zu können.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein adaptives Korrekturverfahren zur Reduktion von schnellen Roboterbahnabweichungen entwickelt. Das korrigierte Verhalten wird in Form von Parametern einer nichtkausalen Vorsteuerung der Soll-Bahn abgespeichert. Zur Kompensation von nichtlinearen Streckeneigenschaften werden Neuronale Netze eingesetzt. Die Elastizitäten der Roboterelenke werden dabei durch spezielle Messeinrichtungen erfasst und berücksichtigt.

Der durch das adaptive System geregelte Roboter ist Kern einer Architektur zur Anpassung von schnellen Roboterbahnen an eine a priori unbekannte oder zumindest ungenau bekannte oder zwischenzeitlich veränderte Umgebung. Dabei wird die reale Umgebung online sensorisch erfasst. Die Architektur erlaubt die Fusion von unterschiedlichen Typen von Sensoren zur aufgabenabhängigen Spezifikation der gewünschten Bewegung. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird die Dynamik des Zielsystems im gesamten Entwurf explizit berücksich-

tigt. Zusammen mit der Vorsteuerung erlaubt dies eine schnelle und fehlerfreie Ausführung sensorisch definierter Bahnen.

Die Experimente mit dem vorgestellten Verfahren zeigen, dass eine einmalige Adaption des Roboterhaltens den dynamischen Bahnfehler gegenüber der ursprünglichen Robotersteuerung bei schnellen Bewegungen nahezu bahnunabhängig deutlich verkleinern kann. Bei einer problemangepassten Adaption für eine bestimmte definierte Bewegung lässt sich der Bahnfehler weiter reduzieren.

Es wird gezeigt, dass das Verfahren in übliche Robotersteuerungen integriert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Übersicht	iii
Vorwort	v
Liste der verwendeten Symbole	xiii
Allgemeine Notation	xiii
Variablen und Funktionen	xiv
Indizes	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung und Beitrag der Arbeit	8
1.4 Gliederung der Arbeit	10
2 Ansätze zu Regelungsverfahren für bahntreue Roboterbewegungen	12
2.1 Konventionelle Positionsregelung	12
2.1.1 Allgemeine Struktur	12
2.1.2 Kaskadenregelung mit Vorsteuerung	15

2.2	Andere Verfahren der Positionsregelung	16
2.2.1	Modellbasierte Regelung	17
2.2.2	Prädiktive Regelung	19
2.2.3	Berücksichtigung von Elastizitäten	21
2.3	Modifikation von Bewegungen aufgrund von Sensorinformationen	21
2.3.1	Kraftregelung	22
2.3.2	Andere sensorgestützte Regelungen	24
2.3.3	Regelung auf der Basis von 2D Sensorik	26
2.4	Mögliche Adaptionenverfahren	28
2.4.1	Strukturen von Adaptionenverfahren	28
2.4.2	Strukturadaptive Verfahren	30
2.4.3	Lernverfahren	37
2.4.4	Adaptionenverfahren bei Roboterregelungen	38
2.4.5	Steuerung für wiederkehrende Bewegungen	38
2.5	Schlussfolgerungen	40
3	Bewertung von industriellen Robotersystemen bezüglich ihrer Bahngenaugigkeit	43
3.1	Vorbemerkungen	43
3.1.1	Testsysteme	45
3.1.2	Andere Robotersysteme	46
3.1.3	Absolute Positionsmessung	49
3.1.4	Positionsmessung bei elastischen Achsen	50
3.1.5	Art der Bahnvorgabe	51

3.1.6	Auswahl repräsentativer Kurventypen	53
3.1.7	Gütemaße	55
3.2	Messung der Bahngenaugigkeit auf vorgegebenen Trajektorien . .	57
3.2.1	Freie Bewegungen im Raum	57
3.2.2	Einfluss von externen Kräften	63
3.3	Bahngenaugigkeit bei sensorisch modifizierten Bahnen	67
3.3.1	Konturverfolgung mit einem Kraft- / Momentensensor .	67
3.3.2	Steuerung des Roboters aufgrund von Bildinformationen	68
3.4	Verifikation durch externe Messgeräte	71
3.5	Diskussion der Messungen	77
3.5.1	Genauigkeit der Messungen	77
3.5.2	Interpretation der Messungen	78
3.5.3	Ursachen der Bahnabweichungen	79
3.5.4	Schlussfolgerungen	80
4	Entwurf eines Steuerungsansatzes zur Verbesserung der Bahn- genauigkeit	81
4.1	Aufgabenstellung	81
4.2	Ansatz zu einem hierarchischen Steuerungssystem	83
4.2.1	Voraussetzungen	83
4.2.2	Mögliche Architekturen	83
4.2.3	Vorschlag zu einem 3-stufigen System	88
4.2.4	Eigenschaften der gewählten Struktur	91
4.3	Vorschlag für eine vorausplanende Steuerung	94

4.3.1	Annahmen	94
4.3.2	Anforderungen an Industrierobotersteuerungen	96
4.3.3	Struktur des adaptiven Systems	98
4.3.4	Erweiterte Architektur für elastische Roboter	104
4.4	Vorschlag für eine sensorgestützte Anpassung der Bahn	107
4.4.1	Anforderungen	107
4.4.2	Verarbeitung von Sensordaten	108
4.4.3	Erweiterte Steuerungsarchitektur für elastische Roboter .	116
4.5	Erwartete Genauigkeit und Resümee	120
5	Adaptionsvorgang der vorausplanenden Steuerung	123
5.1	Identifikation von Struktur und Parametern des Roboters mit unterlagerter Regelung	123
5.1.1	Mögliche Identifikationsverfahren	124
5.1.2	Wahl der Modellstruktur	127
5.1.3	Identifikation der Parameter	131
5.2	Schätzung der optimalen Stellgrößen	133
5.2.1	Auswertung der Gewichtsfunktion zur Bahnsteuerung . .	136
5.2.2	Auswertung der Gewichtsfunktion bei Messwertrückführung	143
5.2.3	Stabilitäts- und Konvergenzkriterien	146
5.3	Wahl der Reglerstruktur	148
5.4	Adaption der linearen Teilkomponenten des Reglers	154
5.4.1	Bestimmung der Parameter zur Vorsteuerung ungestörter Trajektorien	154

5.4.2	Bestimmung der Parameter zur Messwertrückführung für gestörte Trajektorien	156
5.4.3	Einfluss von externen Kräften	160
5.5	Repräsentation und Adaption nichtlinearer Eigenschaften	167
5.5.1	Nichtlinearitäten aufgrund von ortsabhängigem Verhalten	167
5.5.2	Neuronale Netze zum Abbilden der nichtlinearen Abhängigkeiten	171
5.5.3	Kompensation von Kopplungen durch Neuronale Netze .	176
5.5.4	Vereinfachte Berücksichtigung der Kopplungen der Handachsen	182
5.6	Adaption bei nichtlinearen Gütemaßen	185
5.6.1	Explizite Berücksichtigung der Extremwerte	185
5.6.2	Kartesische Gütemaße	187
5.7	Resümee	189
6	Experimentelle Bewertung der adaptiv vorausplanenden Steuerung	192
6.1	Verhalten bei rein linearen Vorsteuerungen	192
6.1.1	Training der Vorsteuerung	192
6.1.2	Messung der Bahngenauigkeit an untrainierten Bahnen .	197
6.1.3	Verifikation der Messung	199
6.1.4	Bewertung	203
6.2	Verbesserungspotential durch Neuronale Netze	205
6.3	Einfluss von Kontaktkräften	213
6.4	Erreichbare Genauigkeit bei wiederholten Bewegungen	215

6.5	Wirkung nichtlinearer Gütemaße	219
6.6	Anwendung der adaptiv vorausplanenden Steuerung auf sensor- basiert geplante Bahnen	222
6.6.1	Prinzipielles Problem	222
6.6.2	Kraftregelung	223
6.6.3	Tracking mit visuellem Sensor	229
6.7	Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse	234
7	Zusammenfassung und Ausblick	238
7.1	Hierarchische Architektur für schnelle sensorbasierte Bewegungen	238
7.2	Adaptiv vorausplanende Steuerung	239
7.3	Ergebnis	240
7.4	Ausblick	241
	Literaturverzeichnis	244
A	Kalman Filterung	271
A.1	Rekursives Kalman Filter	273
A.2	Inverser Kalman Algorithmus für große Gleichungssysteme . . .	276
A.3	Erweitertes Kalman Filter	280
B	Training von Neuronalen Netzen - EKFNet	282
C	Testbahnen zur Beurteilung der Bahngenauigkeit	287
D	Sensorbasierte Erzeugung von Bahnen	297

D.1	Anwendung des Kraftsensors zur Bahnplanung für die Konturverfolgung	297
D.1.1	Stabilität der Kraftregelung	301
D.2	Verwendung eines Bildverarbeitungssystems als prädiktiven Sensor	302
	Lebenslauf	304

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Frage untersucht, warum Industrieroboter bei schnell abgefahrenen Bahnen die vorgegebenen Trajektorien nur sehr ungenau einhalten können. Üblicherweise werden zur Behebung dieser Abweichungen beim Einprogrammieren einer Bahn von einem Bediener Korrekturen vorgegeben (Teach-in), durch die die resultierende Trajektorie die erlaubten Toleranzen einhält.

Es wurde eine Methode entwickelt, mit der das Teach-in durch eine adaptive Vorsteuerung ersetzt wird. Ziel war es, die dynamischen Bahnabweichungen zu minimieren. Als besonders vorteilhaft erwies sich dabei, dass das entwickelte Verfahren im Gegensatz zum klassischen Teach-in kein wiederholtes Abfahren derselben Bahn voraussetzt sondern sogar bei nur einmal auszuführenden Bewegungen die gewünschten Eigenschaften zeigt.

Außerdem wurde eine hierarchische Architektur vorgestellt, die den Einsatz der Vorsteuerung bei sensorbasierten Bewegungen erlaubt. Dadurch werden auch statische Ungenauigkeiten des Roboters oder Unsicherheiten in der Aufgabenbeschreibung ausgeglichen.

7.1 Hierarchische Architektur für schnelle sensorbasierte Bewegungen

Die Architektur besteht aus drei Ebenen, von denen die untere durch die vom Roboterhersteller vorgesehene industrielle Steuerung (Kaskadenregelung) reali-

siert ist. Die mittlere Ebene bildet eine adaptive Vorsteuerung. Beide Ebenen gemeinsam stellen einen *idealen Roboter* dar, dessen Entwurf bzw. Adaption unabhängig von der Aufgabe erfolgt. Die obere Ebene enthält die Bahnplanung unter Einbeziehung der Sensordatenverarbeitung. Diese Ebene ist im Gegensatz zu bekannten Verfahren der Rückkopplung von Sensordaten nicht vom realen Robotersystem oder seiner industriellen Steuerung beeinflusst. Sie wird stattdessen unter Einbeziehung der Aufgabenstellung und der verfügbaren Sensoren konfiguriert.

Schnittstelle zwischen der oberen und der mittleren Ebene sind Soll-Positionen und ggf. die dabei erwarteten Kontaktkräfte. Diese Daten werden von der oberen Ebene sowohl für den aktuellen Zeitschritt als auch für weitere, zukünftige Abtastschritte bereitgestellt, da nach Ansicht des Autors die Kenntnis der jeweils zukünftig gewünschten Bewegungen bei üblichen Industrierobotern die einzige Möglichkeit zu einer merklichen Erhöhung der Bahngenauigkeit ist.

7.2 Adaptiv vorausplanende Steuerung

Die mittlere Ebene des hierarchischen Systems ist durch eine vorausplanende Steuerung realisiert, da nur dadurch die erwähnte Information über die zukünftige gewünschte Bewegung verarbeitet werden kann.

Grundlage der Verbesserung der Bahngenauigkeit ist eine adaptive Struktur, die im Gegensatz zu anderen Adaptionsverfahren in drei Schritten arbeitet: Zuerst wird aufgrund einer Beispieltrajektorie ein grobes Streckenmodell identifiziert. Dieses Modell kann dann benutzt werden, um die Bewegungsanweisungen der Beispieltrajektorie zu optimieren. In einem dritten Schritt wird die optimierte Stellfolge schließlich auf einen Regler bzw. eine Vorsteuerung abgebildet.

Die Adaption erfolgt iterativ, d. h. eine zunächst suboptimale Vorsteuerung wird angewendet, um genauere Informationen zu gewinnen, die zu einer weiteren Reduktion des Bahnfehlers führen. Der Einfachheit halber wurde die Adaption offline demonstriert. Dabei konvergieren die Reglerparameter innerhalb weniger Iterationen. Eine andauernde Adaption ist also nicht nötig. Durch einen Kalman-Filter-basierten Entwurf des dreistufigen Schätzverfahrens garantieren die implementierten Algorithmen auch numerische Stabilität.

Zur Darstellung von nichtlinearen Effekten wurden Neuronale Netze vorgeschla-

gen. Als Netztyp wurden mehrschichtige Perzeptrons ausgewählt, da sie sich bei großem Eingangsbereich am genauesten trainieren lassen. Trotzdem reichen die bekannten Verfahren zum Training nicht aus. Deswegen wurde ein Algorithmus auf der Basis des erweiterten Kalman Filters entwickelt.

7.3 Ergebnis

Das Verfahren wurde an vorgegebenen und an sensorgestützt erzeugten Bahnen erfolgreich eingesetzt. Schon bei linearer Vorsteuerung lässt sich eine Reduktion des an den Achsen gemessenen Bahnfehlers bei schnellen Bewegungen auf ein oder zwei zehntel Millimeter erreichen. Diese Verbesserung wird durch einmaliges Training des Roboters erreicht, z. B. bei der Installation. Die Neuronalen Netze verringern dabei die Störungen durch Kopplungen bis zum Faktor 5. Durch Training einer bahnspezifischen Steuerung lässt sich der verbleibende Fehler noch einmal halbieren. Die während einer Trajektorie auftretenden maximalen Bahnabweichungen lassen sich durch spezielle Wahl des Gütekriteriums selektiv reduzieren.

Im Gegensatz zu den in der Literatur durch Lernen erzielten leichten Verbesserungen, insbesondere durch Rückführung von Positions- oder Sensorwerten, ließ sich eine Reduktion der Bahnfehler um größenordnungsmäßig 90 % erreichen. Darüber hinaus sind die Vorsteuerungen im Gegensatz zu Lernverfahren bahnunabhängig gültig, erfordern also ein im Vergleich zur späteren Nutzung sehr geringes Training.

Im Vergleich zu modellbasierten Reglerentwürfen hat die adaptiv vorausplanende Steuerung insbesondere folgende Vorteile:

- Sie erfordert kein genaues dynamisches Modell des Roboters.
- Sie ist in bestehende Robotersteuerungen integrierbar.
- Der erforderliche Aufwand ist äußerst gering.

Die Arbeit zeigte aber auch Einschränkungen, in denen das Verfahren keine zufrieden stellenden Resultate bringt. Das betrifft vor allem die Bahngenauigkeit bei schnellem Abfahren von sensorgestützt modifizierten Bahnen. Es wurde

aber auch begründet, dass in dem Fall aufgrund von Stellgrößenbegrenzungen keine bessere Regelung möglich ist, sofern die Sensorik nicht prädiktiv in jedem Abtastschritt auch die zukünftigen Soll-Positionen bestimmen kann. Eine weitere Einschränkung betrifft die Kompensation von Kopplungen. So ist die Adaption der achsübergreifenden Einflüsse zwar nicht so bahnspezifisch wie eine Bahnsteuerung, die Verallgemeinerungsfähigkeit der Neuronalen Netze reicht allerdings nur für ähnlich Bahnen aus, was die praktische Anwendbarkeit sehr einschränkt. Schließlich lassen sich Schwingungen der Armelemente nur insoweit kompensieren, als sie messtechnisch erfasst werden. Eine Verbesserung dieses Punktes ist aufgrund der gewählten, allgemein verfügbaren Sensorschnittstelle kaum möglich.

Trotzdem ermöglicht das Verfahren den Einsatz von Industrierobotern für Aufgaben, die bisher aus Genauigkeitsgründen nicht oder nur bei eingeschränkter Ausführungsgeschwindigkeit automatisiert werden konnten. So erlauben die erreichten Verbesserungen auch bei hohen Bahngeschwindigkeiten das millimetergenaue Auftragen von Kleber oder Schneiden von Blechen. Die demonstrierte Genauigkeit ist Grundlage für die direkte Anwendung offline programmierter Bahnen. Darüber hinaus kann mit der vorgestellten hierarchischen Struktur auch bei grob geplanten Bahnen, die sensorgestützt verfeinert werden, mit ähnlich geringen Abweichungen vom gewünschten Verhalten gerechnet werden, sofern die Sensorik eine Prädiktion vorsieht. Im Fall einer visuell erfassten Soll-Bahn konnte die erforderliche Bahngenauigkeit bei voller Geschwindigkeit eingehalten werden.

7.4 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat die Verbesserung der Bahngenauigkeit bei den im Institut für Robotik und Mechatronik des DLR vorhandenen Industrierobotern mit den dort verfügbaren Messgeräten untersucht. Bei schnellen Robotern machten sich Nachgiebigkeiten im Getriebe bemerkbar. Das führte dazu, dass die industrielle Steuerung die tatsächliche Armposition nicht genau erfassen konnte. Für den Fall wurde die Adaption aufgrund der Werte eines externen Messgerätes gezeigt. Die Übertragbarkeit auf andere Bahnen oder Roboter, für die keine Messanordnung zur Verfügung steht, ist möglich, wobei mit Genauigkeitseinbußen von größenordnungsmäßig 0.1 mm für den mittleren Fehler gerechnet werden muss. Hier lassen sich mit anderen Messgeräten oder Robo-

tertypen weitere Erfahrungen gewinnen, wobei online auswertbare Messgeräte vorteilhaft sind, da sie im Unterschied zu den aufgeführten Experimenten auch bei der sensorgestützten Bahnplanung eingesetzt werden können.

Außerdem sind in einigen Punkten alternative Realisierungen möglich. Dazu gehört z. B. die Implementierung von Neuronalen Netzen mit radialen Basisfunktionen anstelle der mehrschichtigen Perzeptrons. Eine andere Möglichkeit der Weiterentwicklung des Verfahrens besteht in der Darstellung des Zeitverhaltens der Vorsteuerung. Bei hohen, von der industriellen Steuerung vorgegebenen Abstraten zukünftiger Roboter ist die Zahl der Parameter der linearen Elemente bzw. die Zahl der Eingänge der nichtlinearen Anteile so groß, dass andere Darstellungen günstiger werden. Z. B. kann dann eine Repräsentation der Vorsteuerung durch orthonormale Basisfunktionen geeignet sein.

Schließlich wurde die Bahnplanungsebene nur exemplarisch betrachtet. In diesem Bereich können weitere Untersuchungen erfolgen, um in Abhängigkeit von Beispielaufgaben mit festgelegter Sensorkonfiguration ggf. effektivere Methoden zu entwickeln. Dazu gehört sicherlich auch die Prüfung von adaptiven Ansätzen, die in Bezug auf die Bahnplanung den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte.

In dieser Arbeit konnten Methoden entwickelt und im Laborversuch beurteilt werden. Erfahrungen von industriellen Langzeituntersuchungen bei typischen Aufgaben unter Verwendung der entsprechenden Werkzeuge stehen bisher noch aus und werden der nächste Schritt zur Praxiseinführung sein.

Auf längere Sicht erfordert auch die Strategie der Nutzung prädiktiv vorausschauender Sensoren noch weitere Überlegungen zur Entwicklung und Integration geeigneter Komponenten.

In Zukunft wird es auch möglich sein, Roboter unter Verwendung eines vollständigen dynamischen Modells genauer zu regeln als dies mit den heute noch geltenden Aufwandsbeschränkungen für den Echtzeitbetrieb der Fall ist. Dann wird die Qualität der Regelung insbesondere von der Verfügbarkeit geeigneter dynamischer Modelle (z. B. zur Beschreibung von Reibungseinflüssen) und der (wirtschaftlichen) Identifizierbarkeit ihrer Parameter abhängen. Aufgrund von immer existierenden Restunsicherheiten der Modelle werden adaptive Verfahren als Ergänzung zukünftiger Steuerungen eingesetzt werden, um die verbleibenden Bahnfehler zu reduzieren. Die strukturellen Unterschiede gegenüber heutigen Industrieroboterregelungen sowie die qualitativ bessere Regelgüte solch zukünftiger Steuerungen werden allerdings eine Anpassung der für

heutige Steuerungen entwickelten adaptiven Verfahren erfordern.