

Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Evert Helms
aus Amsterdam

Hauptberichter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. P. Klemm
Tag der mündlichen Prüfung:	8. Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

0	Abkürzungen und Formelzeichen	14
1	Einleitung	20
1.1	Problemstellung.....	20
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	21
2	Ausgangssituation.....	23
2.1	Begriffe und Definitionen.....	23
2.2	Stand der Technik von Vorrichtungen zur Bahnführungsunterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen.....	25
2.3	Stand der Technik und Forschung der Unterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen durch Roboter	25
2.3.1	Mobile Manipulatoren.....	25
2.3.2	Medizinische Assistenzroboter.....	27
2.3.3	Cobots und Roboter zur direkten Handhabungsunterstützung.....	28
2.3.4	Bestehende Assistenzrobotersysteme.....	28
2.4	Technologien, Verfahren und Methoden zur Umsetzung roboterbasierter Bahnführungsunterstützung	30
2.4.1	Sicherheitskonzepte für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation	30
2.4.2	Physische Kooperation zwischen Mensch und Roboter.....	32
2.4.3	Programmierung und Mensch-Roboter-Interaktion	33
2.4.4	Verfahren und Methoden zur Platzierung von Robotern	34
2.5	Folgerungen aus dem Stand der Technik und Forschung	35
3	Analyse der Produktionssituation und potenzieller Anwendungsszenarien sowie der Automatisierungsaufgabe und Ableitung von Anforderungen an Systeme für die roboterbasierte Bahnführungsunterstützung	37

3.1	Potenzial für den Einsatz von Assistenzrobotern bei der Automatisierung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen.....	37
3.2	Analyse zu unterstützenden Bahnführungsaufgaben.....	39
3.2.1	Identifizierung geeigneter Fertigungsverfahren zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung.....	39
3.2.2	Bahneigenschaften der zu unterstützenden Handhabungs- und Bearbeitungsprozesse.....	39
3.2.3	Ermittlung von Assistenzfunktionen zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung der identifizierten Handhabungs- und Bearbeitungsprozesse.....	41
3.2.4	Analyse von Einsatzszenarien	44
3.3	Analyse von bestehenden nutzbaren Steuerungskonzepten und -architekturen von Robotern zur Bahnführungsunterstützung.....	46
3.4	Analyse von Sicherheitsbestimmungen zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung	47
3.4.1	Richtlinien und Normen zur Ableitung von sicherheitsrelevanten Anforderungen an roboterbasierte Bahnführungsunterstützung	47
3.4.2	Grenzwerte für die sichere physische Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter	49
3.5	Folgerungen aus den Analyseergebnissen und Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten.....	50
3.6	Ableitung von Anforderungen an Systeme und Verfahren zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen	52
3.6.1	Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen.....	52
3.6.2	Anforderungen an das Gesamtsystem	53
3.6.3	Anforderungen an das Handhabungs- und Positioniersystem.....	53
3.6.4	Anforderungen an das Interaktionssystem	54
3.6.5	Anforderungen an das Sensorsystem und die Prozessmodule.....	54
3.6.6	Anforderungen an das Steuerungssystem.....	55

4	Konzeption von Teil- und Gesamtsystemen zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen	56
4.1	Konzeption alternativer Gesamtsystemvarianten	56
4.2	Konzeption alternativer Varianten zum Handhabungs- und Positioniersystem	58
4.3	Konzeption alternativer Varianten für das Interaktionssystem	60
4.4	Konzeption von Steuerungsalternativen für das Handhabungssystem	61
4.4.1	Konzeption der Steuerungsstruktur des Handhabungssystems	61
4.4.2	Konzeption eines benutzerspezifischen Bewegungsfunktionsgerüsts für die roboterbasierte Bahnführungsunterstützung	63
4.5	Konzeption der Bewegungssteuerung für das Positioniersystem	65
4.5.1	Konzeption alternativer Bewegungsstrategien für das Positioniersystem....	65
4.5.2	Konzeption alternativer Lösungsvarianten für die Fahrstrategie einer nicht-holonomen, mobilen Plattform bei der roboterbasierten Bahnführungsunterstützung.....	68
5	Entwicklung und Verifikation von Steuerungsverfahren zur roboterbasierter Bahnführungsunterstützung für industrielle Handhabungs- und Bearbeitungsprozesse	69
5.1	Ermittlung von Einflussgrößen und grundlegende Zusammenhänge	69
5.2	Modellierung des Bewegungspotenzials des roboterbasierten Bahnführungsunterstützungssystems	70
5.3	Entwicklung eines Verfahrens zur Bewegungssteuerung einer mobilen Plattform für die roboterbasierte Bahnführungsunterstützung	71
5.3.1	Herleitung eines Plattformbewegungsablaufs beim entwickelten Verfahren zur Bewegungssteuerung bei der Bahnführungsunterstützung .	71
5.3.2	Ermittlung des durch das Handhabungssystem bestimmten Bewegungspotenzials der roboterbasierten Bahnführungsunterstützung...	75
5.3.3	Bestimmung des Bewegungspotenzials der mobilen Plattform anhand von Sicherheitskriterien, Umgebungsbedingungen und nicht-holonomen Bewegungseinschränkungen	83

5.3.4	Ermittlung des Plattformbewegungsraums für eine optimale Plattform-Manipulator-Konfiguration.....	93
5.3.5	Ermittlung von Plattformpositionen zur Ermöglichung langer Plattformstillstandsintervalle	95
5.4	Entwicklung eines Verfahrens zur Bewegungssteuerung eines Handhabungssystems zur benutzer- und aufgabenspezifischen Unterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen.....	96
5.4.1	Entwicklung eines Funktionsgerüst für die Bewegungssteuerung zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung	96
5.4.2	Bestimmung der Grenzen der Bahnführungsunterstützungsparameter	99
5.5	Implementierung der Berechnungsverfahren und Verifikation an ausgewählten Szenarien	100
5.5.1	Simulation „AssistanceSim“	100
5.5.2	Berechnungsergebnisse und Verifikation	103
5.6	Folgerungen	106
6	Realisierung einer Gesamtsystemvariante „Mobiler Manipulator“ und Erprobung am Beispiel eines Szenarios zum bahnführungsunterstützten Mehrlagenschweißen	108
6.1	Gesamtaufbau des Assistenzrobotersystems rob@work.....	108
6.2	Umsetzung eines Assistenzbaukastens zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen	113
6.3	Prozessablauf in der Versuchsanlage	115
6.4	Erprobung des Verfahrens zur Bewegungssteuerung eines Manipulatorarms zur benutzer- und aufgabenspezifischen Unterstützung von Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen	117
6.5	Erprobung des Verfahrens zur roboterbasierten Bahnführungsunterstützung bei mitbewegter mobiler Plattform am Beispiel eines Szenarios zum Schutzgasschweißen.....	119
6.5.1	Werkstück und Nahtgeometrie.....	119
6.5.2	Berechnungsergebnisse zur Plattformsteuerung.....	119

6.5.3	Mit dem Verfahren zur Plattformsteuerung erzeugte Plattformbahnen....	122
6.5.4	Schweißergebnis.....	125
6.5.5	Berechnungs- und Prozesszeiten	125
6.5.6	Fehlerhäufigkeiten und Störungen	126
6.6	Erkenntnisse und Folgerungen	127
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
8	Summary	132
9	Literatur.....	134

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Eine der bedeutendsten Technologien in der post-industriellen und technologischen Gesellschaft ist die Robotertechnik [CASTELLS96]. Für das Jahr 2005 prognostiziert der Bericht der UN Economic Commission for Europe die Anzahl eingesetzter Roboter auf 965.000, wobei die Wachstumsrate in der EU inzwischen höher ist als in Japan, dem traditionell größten Markt für Industrieroboter [UNECE02]. Ein wesentlicher Trend besteht in einer stetigen Steigerung von Handhabungsgewicht, Steuerungsfunktionalität und Verfügbarkeit, bei gleichzeitiger Senkung der Kosten.

Konventionelle Robotersysteme stoßen jedoch an wirtschaftliche und technologische Grenzen, wenn die Aufgabenausführung ein Maß an Wahrnehmung, Geschicklichkeit oder Entscheidungsfähigkeit erfordert, das nicht robust oder kostengünstig verwirklicht werden kann [HAEGELE01]. Ein Robotersystem kann in diesen Fällen, aufgrund der Aufwände für Sensortechnik und Informationstechnologie, nicht kostengerecht mit einer manuellen Ausführung der Aufgabe konkurrieren. Durch Kundennähe schwankt die Auftragsituation kurzfristig. Stückzahlen und Losgrößen nehmen ab und die Variantenvielfalt nimmt zu. Dies erfordert eine permanente Anpassung des Produktionssystems [WESTK03] und schafft die zwingende Notwendigkeit, sich durch erhöhte Wandlungsfähigkeit auszuzeichnen [WESTK99]. Ein Ansatz zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit eines Robotersystems ist die direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. Ziele dieser sog. Assistenzrobotersysteme ist die arbeitsteilige Ausführung der Bearbeitungs- bzw. Handhabungsaufgabe mit dem Menschen [HELMS05]. Die sensorischen Fähigkeiten, das Wissen und die Geschicklichkeit des Menschen werden so mit den Vorteilen des Roboters, wie Kraft, Ausdauer, Schnelligkeit und Genauigkeit zu einem erweiterten Arbeitssystem verknüpft [HELMS03].

Die Einführung von Assistenzrobotern wird insbesondere ermöglicht durch aktuelle Entwicklungen auf den Gebieten der Sicherheits-, Sensor- und Informationstechnologie. Bisher existieren jedoch keine hinreichenden Erkenntnisse über Steuerungs- und Sicherheitsstrategien für Assistenzroboter zur Unterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Bahnführungsunterstützung von industriellen Bearbeitungs- und Handhabungsprozessen mit einem Roboter zu erarbeiten und auf dieser Grundlage Verfahren und Methoden zur benutzer- und aufgabenangepassten Steuerung von stationären und mobilen Assistenzrobotern zur Bahnführungsunterstützung zu entwickeln.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

- Durchführung von grundlegenden Untersuchungen zur Bahnführungsunterstützung mit Robotern und Ableitung geeigneter Konzepte für entsprechende Robotersysteme
- Entwicklung von Verfahren und Methoden, um Bearbeitungs- und Handhabungsprozesse flexibel, an Arbeitsaufgabe und Benutzer angepasst, mit einem Roboter zu unterstützen
- Entwicklung von Verfahren und Methoden zur Nutzung der Mobilität von Assistenzrobotern zur Vergrößerung des Arbeitsraums und der möglichen Einsatzorte

Die Darstellung des Standes der Technik zeigt auf, welche Konzepte, Verfahren und Systeme zur roboterassistierten Aufgabenausführung existieren. Angewendete Sicherheitskonzepte werden benannt und Steuerungsverfahren für stationäre wie auch für mobile Systeme klassifiziert. Bestehende Defizite werden hierbei identifiziert.

Die Analyse von zu unterstützenden Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen, der anwendbaren Assistenzfunktionen, geeigneter Anwendungsszenarien, der möglichen Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter, nutzbarer Steuerungsstrukturen, der für die Bahnführungsunterstützung relevanten Eigenschaften des Menschen sowie der Sicherheitsanforderungen bilden die Grundlage zur Definition erforderlicher Teilsysteme und zur Ableitung von Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teilsysteme.

Basierend auf den abgeleiteten Anforderungen werden alternative Teil- und Gesamtsysteme zur Bahnführungsunterstützung, dem Positionier- und Handhabungssystem, dem Interaktionssystem, der Steuerungsstruktur sowie der Steuerungsstrategie für Positionier- und Handhabungssystem konzipiert und bewertet.

Auf der Basis von Voruntersuchungen zur Mensch-Roboter-Kooperation wird ein Steuerungsverfahren entwickelt, mit dem ein Roboter benutzer- und aufgabenspezifisch eingesetzt werden kann. Weiterhin wird ein Verfahren entwickelt, mit dem mobile Assis-

tenzroboter Bahnführungsunterstützung ortsflexibel und zeitgleich zur Aufgabenausführung ausführen können und auf diese Weise der Arbeitsraum dieser Systeme wesentlich vergrößert wird.

Die entwickelten Verfahren werden mit einem realisierten Versuchssystem erprobt und die technische Machbarkeit nachgewiesen. Ein entwickelter Assistenzfunktionsbaukasten wird dargestellt, mit dem die geforderten Assistenzfunktionen aufgabenabhängig konfiguriert bzw. zusammengestellt werden können. Die während der Erprobung ermittelten Erfahrungswerte werden dargestellt und mögliche Weiterentwicklungen aufgezeigt.