

# Mobile Manipulation — Kopplung von mobiler Plattform und Manipulatoren für ein autonomes Robotersystem

U. Nassal, M. Damm, T. Lüth

Institut für Prozeßrechentechnik und Robotik  
Universität Karlsruhe, D - 76128 Karlsruhe  
e-mail: nassal@ira.uka.de

*Bisher dient bei autonomen mobilen Manipulatorsystemen die mobile Plattform in erster Linie zum Transport der Manipulatoren. Prinzipiell läßt sich die Plattform aber auch an einer Arbeitsstation zur Erweiterung des Arbeitsraums des Manipulatorsystems (ein- oder mehrarmig) einsetzen. In diesem Artikel werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Kooperation einer mobilen Plattform mit daran montierten Manipulatoren untersucht. Es wird ein Realisierungskonzept für einen Kopplungstyp vorgestellt und auf ein existierendes mobiles Zweiarm-Robotersystem übertragen. Abschließend folgt eine Beschreibung der mit dem Robotersystem durchgeführten Experimente.*

## 1 Einführung

Ein autonomes mobiles Manipulatorsystem besteht aus einer beweglichen Plattform und einem oder mehreren Manipulatoren. Ein solches System weist in den allermeisten Fällen bezüglich der Tool-Center-Points (TCP) der Manipulatoren eine redundante Kinematik auf, die unausgenutzt bleibt. Obwohl Manipulatoren mit redundanter Kinematik in der Literatur bereits allgemein behandelt wurden, gibt es bisher nur wenige Beiträge, die daneben die besonderen Möglichkeiten der Arbeitsraumvergrößerung der Manipulatoren durch die Beweglichkeit einer mobilen Plattform berücksichtigen. Die meisten Arbeiten für die Steuerung mobiler Plattformen befassen sich mit der Navigation und der Vermeidung von Kollisionen während der Fahrt, betrachten aber evtl. montierte Manipulatoren getrennt. In einigen Arbeiten werden mobile Manipulatorsysteme als Spezialfall einer redundanten Manipulatorkinematik betrachtet, in denen allein die genaue Regelung des Manipulators in Anbetracht der Ungenauigkeiten der mobilen Plattform Gegenstand ist.

In diesem Beitrag werden die unterschiedlichen Ansätze zur Integration von Mobilität und Manipulation diskutiert und ein neues Konzept für die Realisierung bei einem mobilen Zweiarmsystem vorgestellt. Das Zielsystem, in dem das entwickelte Konzept schließlich eingesetzt werden soll, ist der KAMRO (**K**arlsruhe **a**utonom **m**obiler **R**oboter). Seine mobile Plattform besitzt drei Freiheitsgrade, zwei translatorische und einen rotatorischen, die aus dem omnidirektionalen Antrieb resultieren. Zur

Vermeidung von Kollisionen ist die Plattform mit Ultraschallsensoren ausgestattet. Das Manipulatorsystem besteht aus zwei sechsachsigen Knickarmrobotern, die in hängender Konfiguration auf der mobilen Plattform angebracht sind. Jeder Manipulator ist mit einem Kraft-/Drehmomentensensor mit integriertem Elektrogreifer ausgestattet, um taktile Operationen zu ermöglichen, sowie mit Miniatur-Hand-Kameras für die Erweiterung der Objekterkennung.

Zur Unterstützung der Manipulatoren wurde die Plattform bisher wie folgt eingesetzt: Die mobile Plattform navigiert zwischen verschiedenen Arbeitsstationen, nimmt dort dann eine definierte Referenzposition ein und hält diese solange, bis die Manipulatoren die dort auszuführende Aufgabe erledigt haben. Anschließend wird die nächste Station angefahren; das Fahrzeug bewegt sich also nicht, während die Manipulatoren aktiv sind. In allen Fällen, in denen die zu manipulierenden Objekte in einem kleinen und stets gleichen Arbeitsbereich liegen, können mit diesem Ansatz die Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Diese Randbedingungen sind zum Beispiel bei den bisherigen Arbeiten in den Sonderforschungsbereichen SFB 314 und 331 vorausgesetzt worden. Es sind aber auch Situationen denkbar, in denen die Plattform an einer Arbeitsstation verfahren werden muß, damit die Manipulatoren ihre Aufgabe erfüllen können. Dann muß eventuell eine Kopplung des Manipulatorsystems mit der mobilen Plattform vorgesehen werden.

## **2 Stand der Technik**

Bei der Kopplung eines Manipulatorsystems mit einer mobilen Plattform müssen sowohl Probleme auf Planungs- als auch auf Steuerungs-/Regelungsebene gelöst werden. Die Kombination eines Manipulators mit einer mobilen Plattform ergibt ein Gesamtsystem mit redundanter Kinematik. Arbeiten über die Steuerung redundanter Kinematiken berücksichtigen aber vor allem Manipulatoren mit mehr als sechs Freiheitsgraden [1], [2]. Andererseits betrachten Arbeiten über die Wegplanung mobiler Manipulatorsysteme die Manipulatoren während der Bewegung als starre Körper [3].

Folgende Artikel behandeln Manipulator und mobile Plattform als integriertes Gesamtsystem: In [4] wird ein Verfahren eingeführt, das es einem mobilen Manipulator erlaubt, auf ein bewegtes Objekt eine definierte Kraft aufzubringen, um es z.B. gemeinsam mit anderen Robotern zu transportieren. Die mobile Plattform sorgt dabei dafür, daß die Manipulatoren in einem gewissen Bereich günstiger Konfigurationen bleiben, so daß sie stets die Möglichkeit haben, kleinere Abweichungen auszuregulieren, ohne die Gelenkansschläge zu erreichen. Die dort vorgestellten Ergebnisse wurden mit einem Manipulator mit 6 Freiheitsgraden und einer mobilen Plattform mit drei Freiheitsgraden und nicht-holonomen Beschränkungen erzielt. Das in [5] vorgestellte System beschreibt Methoden zur Ausführung großräumiger Bewegungen mittels einer reaktiven Steuerung, die Plattform und Manipulator so bewegt, daß Kollisionen vermieden werden. Ziel ist es, den Manipulator schon während der Fahrt in eine solche Konfiguration zu bringen, daß eine anschließende Montageaufgabe ohne Verzug erledigt werden kann.

Die genaue Regelung der Position eines Manipulators in Anbetracht der Ungenauigkeiten durch eine elastische Radaufhängung der mobilen Plattform ist Gegenstand von [6]. Dabei werden die dynamischen Eigenschaften sowohl des Manipulators als auch der mobilen Plattform berücksichtigt. Eine ähnliche Problematik wird in [7] vorgestellt. Hier werden die dynamischen Gleichungen für ein Zweiarmsystem auf einer frei beweglichen Plattform im Weltraum entwickelt. Bei den beiden zuletzt genannten Arbeiten wird die mobile Plattform nicht als Komponente zur *Unterstützung* der Manipulatoren aufgefaßt, sondern nur als Quelle von Störungen im regelungstechnischen Sinne.

In [8] wird ein Verfahren zur Bahnplanung für einen mobilen Manipulator unter Berücksichtigung der Lösungen des inversen kinematischen Problems bei redundanten Kinematiken vorgestellt. Eine Folge von Tasks, die aus der Angabe von Position, Orientierung, Kraft und Drehmoment bestehen, wird in eine Folge von Konfigurationen der mobilen Plattform und des Manipulators transformiert. Mittels einer Kostenfunktion wird aus der durch die Redundanz hervorgerufenen Vielzahl von Lösungen eine ausgewählt. Der Entwurf einer Regelungsstruktur für einen mobilen Manipulator mit einem Arm steht im Mittelpunkt von [9], wobei alle Aktuatoren zentral geregelt werden. Dabei wird für eine vorgegebene Trajektorie des Endeffektors off-line ein Fehlermaß minimiert, das verschiedene Optimalitätskriterien vereint. Die daraus resultierende Trajektorie in erweiterten Koordinaten wird benutzt, um daraus die Bewegung der mobilen Plattform und des Manipulators abzuleiten. Das Verfahren wurde für ein reales System mit insgesamt 9 Freiheitsgraden implementiert. In [10] wird ein Regelungsverfahren vorgestellt, das aufgrund seiner Effizienz echtzeitfähig sein soll. Dabei werden die durch die mobile Plattform zusätzlich eingeführten Freiheitsgrade als weitere Gelenke des Manipulators betrachtet. Diese werden benutzt, um neben der gewünschten Position und Orientierung des Endeffektors noch weitere, vom Benutzer dynamisch veränderbare Bedingungen einzuhalten. Die als Ergebnis vorgestellte Simulation benutzt einen Manipulator mit drei Freiheitsgraden auf einer mobilen Plattform mit nur einem Freiheitsgrad.

### **3 Arten der Manipulator-Plattform-Kopplung**

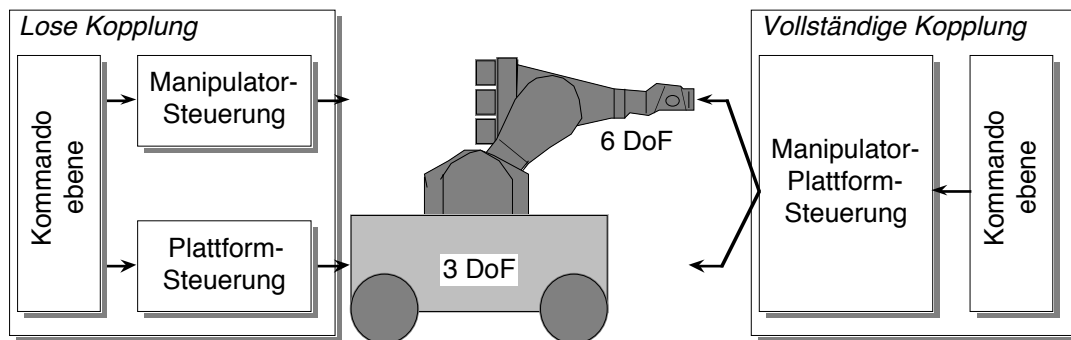
Unter Berücksichtigung der Literaturstellen sind für die Verbindung von mobiler Plattform und darauf befestigten Manipulatoren bzw. zur Ausnutzung der systeminhärenten Freiheitsgrade prinzipiell drei verschiedene Ansätze denkbar. Diese unterscheiden sich im Grad der Kopplung, in der Komplexität der damit verbundenen Teilprobleme und der Leistungsfähigkeit der daraus resultierenden neuen Manipulationsfähigkeiten. Die drei Ansätze lassen sich bei Betrachtung der Konfiguration in Bild 1 und 2 leicht nachvollziehen.

#### **3.1 Lose Kopplung**

Bei einer *losen Kopplung* von mobiler Plattform und Manipulator werden die beiden Systeme getrennt betrachtet. Eine Plattformsteuerung ist für die drei Freiheitsgrade der mobilen Plattform und eine Manipulatorsteuerung für die sechs Freiheitsgrade des

Manipulators vorgesehen. Die Plattform dient zum Transport des Manipulators und vergrößert so dessen Arbeitsraum. Plattform und Manipulator werden immer sequentiell angesteuert.

Diese Art der Kopplung ist geeignet, um den Manipulator zwischen räumlich getrennten Arbeitsstationen zu verfahren oder ihn in eine für die Manipulationsaufgabe günstigere Position zu bringen.



**Bild 1:** Schematischer Aufbau der *losen Kopplung* und der *vollständigen Kopplung*

Die für autonome Systeme sehr wichtige Bewegungsplanung kann hier gut in zwei Einzelaufgaben aufgetrennt werden. Für mobile Plattformen gibt es in der Literatur viele Verfahren für die globale und lokale Wegplanung, die auch bei einem lose gekoppelten System problemlos angewandt werden können. Darüberhinaus spricht nichts Prinzipielles gegen die Verwendung mehrerer Manipulatoren auf einer Plattform.

### 3.2 Vollständige Kopplung

Bei der *vollständigen Kopplung* von mobiler Plattform und Manipulator werden die beiden Systeme wie ein einziges System mit neun Freiheitsgraden betrachtet. Die Plattform ergänzt die Freiheitsgrade des Manipulators und das gekoppelte System hat drei redundante Freiheitsgrade. Plattform und Manipulatoren werden immer gemeinsam für die Veränderung des Tool-Center-Points (TCP) bewegt.

Diese Form der Kopplung ist hinsichtlich optimierter dynamischer Bewegungsabläufe die günstigste Lösung, da beide Teilsysteme in einem geschlossenen Kreis geregelt werden können. Auch bei starken räumlichen Einschränkungen bietet die vollständige Kopplung zumindestens theoretisch optimale Bewegungsmöglichkeiten.

Als äußerst aufwendig und beim heutigen Stand der Technik noch nicht in Echtzeit lösbar gestaltet sich dagegen die für autonome Systeme wichtige Bewegungsplanung. Da bereits bei der Wegplanung des Gesamtsystems alle neun Freiheitsgrade berücksichtigt werden müssen, liegt die Komplexität noch über der Feinbewegungsplanung von Manipulatoren. Der Vorteil, daß zumindestens für die Plattformsteuerung Bahnplanungsalgorithmen vorhanden sind, läßt sich nicht nutzen. Befinden sich mehrere Manipulatoren auf einer Plattform, die eventuell geschlossene kinematische Ketten bilden, dann muß für jede Kombination der Kopplung von

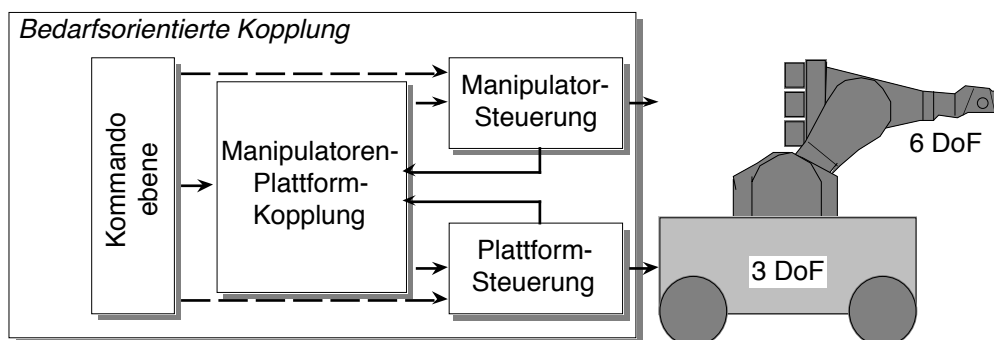
Manipulatoren mit der Plattform eine eigene Steuerung vorhanden sein, um die positiven Eigenschaften dieser Kopplungsform auszunutzen.

### 3.3 Bedarfsorientierte Kopplung

Die im folgenden beschriebene *bedarfsorientierte Kopplung* soll die Vorteile der losen und vollständigen Kopplung miteinander verbinden und die für ein autonomes System nachteiligen Eigenschaften vermeiden. Wie der Name schon sagt, werden hier Plattform und Manipulator zwar als zwei einzelnene Systeme betrachtet, je nach Bedarf aber unter Berücksichtigung unterschiedlicher dynamischer Eigenschaften (Reaktionszeit, Energieaufwand), geometrischer Randbedingungen (Hindernisse, nicht holonome Antriebe) und eingekoppelter Sensorinformationen als Gesamtsystem eingesetzt.

Diese Form der Kopplung unterstützt sowohl das konventionelle Bewegen von Manipulator und Plattform, erlaubt es jedoch auch, die Manipulatorbewegung von der Fahrzeugbewegung zu entkoppeln. Der TCP des Manipulators behält dann während der Plattformfahrt seine Position in Weltkoordinaten bei.

Bei der Bewegungsplanung für die Plattform und die Manipulatoren können die bekannten Algorithmen weiter verwendet werden. Muß die Plattform bewegt werden, um den Arbeitsraum des Manipulators zu vergrößern, kann dies zeitgleich mit der Manipulatorbewegung und unter Berücksichtigung von Hindernissen geschehen. Ebenso wie bei der losen Kopplung können beliebig viele Manipulatoren auf der Plattform montiert sein.



**Bild 2:** Schematischer Aufbau der *bedarfsorientierten Kopplung*

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die mögliche variable Einkopplung von Sensorinformationen, die bei einer losen Kopplung nicht vorgesehen ist und die mögliche Berücksichtigung von nicht holonomen Plattformantrieben, die bei einer vollständigen Kopplung zu Schwierigkeiten führt.

## 4 Konzept für die bedarfsorientierte Kopplung

Das Konzept für die *bedarfsorientierte Kopplung* ist sowohl auf die Unterstützung eines ein- oder mehrarmigen Manipulatorsystem durch die mobilen Plattform als auch

auf die Unterstützung unbeweglicher Sensoren (z.B. Kamerasysteme) ausgerichtet. Dabei werden zum momentanen Zeitpunkt ausschließlich kleinräumige Bewegungen betrachtet, d.h. Bewegungen an einer einzelnen Arbeitsstation. Eine Analyse möglicher Aufgabenstellungen für ein mobiles Zweiarmsystem, wie z.B. das zu Beginn beschriebene System KAMRO, dient zur Definition der Anforderungen:

#### **4.1 Analyse und Anforderungen**

##### 1) Entkoppelte Bewegung der Plattform:

Bei einer Bewegung der mobilen Plattform zur Unterstützung unbeweglicher Sensoren, um beispielsweise den Sichtbereich einer Übersichtskamera zu vergrößern, sollen die Manipulator-TCPs ihre augenblickliche Position beibehalten und ihre gerade ausgeführte Operation zu Ende bringen

##### 2) Vergrößerung des Arbeitsraums für einen Manipulator:

Es müssen zwei Fälle unterschieden werden:

a) *Positionsgeregelte Manipulation:* Die Manipulatoren sollen einen Punkt außerhalb ihres eigenen Arbeitsbereichs anfahren. Durch die drei Freiheitsgrade der mobilen Plattform kann der Arbeitsraum des Manipulators hinsichtlich der Translation in Richtung der x- und y-Achse sowie bezüglich der Rotation um die z-Achse des Plattform-Koordinatensystems erweitert werden.

b) *Kraftgeregelte Manipulation:* Werden im Verlauf einer kraftgeregelten Manipulation die Arbeitsraumgrenzen des Manipulators erreicht, so muß die mobile Plattform unterstützende Bewegungen ausführen. Durch die getrennten Koordinatensysteme kann die Plattform Kräfte und Momente im TCP in unterschiedlichen Richtungen aufbringen.

Der prinzipielle Unterschied zwischen diesen beiden Fällen liegt darin, daß im Fall einer positionsgeregelten Manipulation der Verlauf der Bewegung vorab bekannt ist und damit auch die Plattformbewegung a priori, d.h. global, geplant werden kann. Dagegen muß bei der kraftgeregelten Manipulation ein lokales Planungsverfahren eingesetzt werden.

##### 3) Vergrößerung des Arbeitsraumes für mehrere Manipulatoren:

Bei der Arbeitsraumvergrößerung für zwei (oder mehr) unabhängige Manipulatoren tritt für jeden Manipulator einer der unter 2) genannten Fälle auf. Hinzu kommt noch die Situation, daß mindestens ein Manipulator kraftgeregelt und mindestens ein anderer positionsgeregelt arbeitet und daß nicht alle Manipulatoren zeitgleich unterstützt werden können.

##### 4) Vergrößerung des Arbeitsraumes für eine kinematische Kette:

Bilden zwei (oder mehr) Manipulatoren eine geschlossene kinematische Kette, dann ist dieser Fall prinzipiell identisch mit Fall 2). Der Unterschied liegt lediglich in dem kleineren und anders geformten Arbeitsraum der Kette, weshalb sich hier die Unterstützung durch eine mobile Plattform besonders anbietet.

Aus den vier Aufgabenstellungen ergeben sich folgende Anforderungen:

- Manipulatoren und Plattform müssen sich immer voneinander unabhängig (entkoppelt) bewegen können; die Plattformbewegung muß sensorgeführt sein (Kollisionsgefahr).
- Um die Arbeitsraumvergrößerung für einen Manipulator zu realisieren, muß aus der durch die kinematische Redundanz hervorgerufenen Vielzahl von Lösungen mittels eines Kriteriums eine ausgewählt werden. Dieses Kriterium muß bei unterschiedlichen Aufgabenstellungen verschieden sein.
- Für die Arbeitsraumvergrößerung für mehrere Manipulatoren muß aus der für jeden Manipulator ermittelten Schar von unterstützenden Bewegungen der Plattform eine gemeinsame Bahn ausgewählt werden. Die verbleibende Redundanz kann zur Optimierung eines Gütekriteriums oder zur Erfüllung sensorbasierter Randbedingungen genutzt werden. Erschwerend gegenüber dem Fall eines einzelnen Manipulators tritt bei der Unterstützung mehrerer Manipulatoren die Situation auf, daß sich Bewegungen für die Unterstützung der Manipulatoren gegenseitig ausschließen. Solche Konfliktfälle müssen vorab abgefangen und die verursachenden Manipulatorbewegungen sequenzialisiert werden.
- Die bei einer geschlossenen kinematischen Kette zu betrachtenden Probleme sind im wesentlichen identisch mit denen bei der Arbeitsraumvergrößerung für einen Manipulator.

Darüberhinaus basiert das Konzept der Kopplung auf den zwei Annahmen:

- der Manipulator kann stets schneller als die mobile Plattform bewegt werden,
- eine Planungsebene (global) vergibt die Ressourcen und legt den Typ (1-4) der Aufgabenstellung fest.

## **4.2 Struktur der Manipulatoren-Plattform-Kopplung**

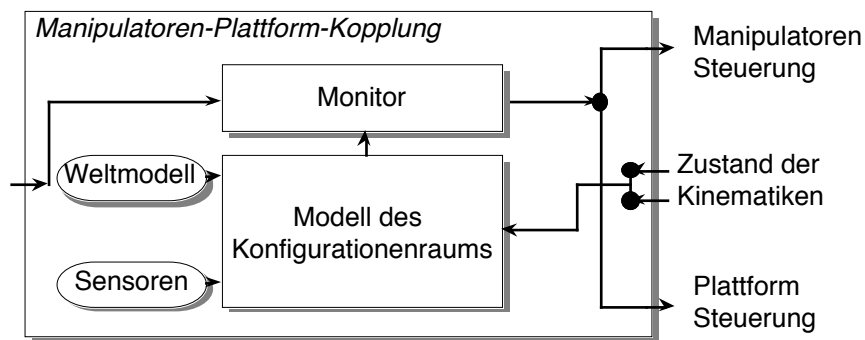
Zur Planung der Bewegungen der mobilen Plattform zur Unterstützung und Arbeitsraumvergrößerung für die Manipulatoren soll ein reaktiver Ansatz verwendet werden. Dabei sollen vorab vorhandene Informationen über die Kinematik der gekoppelten Systeme und die Geometrie der Umgebung aber auch dynamische Informationen, wie die aktuelle Gelenkstellung der Manipulatoren, auftretende Kräfte und mit abstandsmessenden Sensoren festgestellte Hindernisse berücksichtigt werden. Die Ausführung der Bewegungsplanung soll in einem Konfigurationenraummodell erfolgen, wobei durch häufige Neuplanung die dynamische Information eingebunden werden kann. Insgesamt ergibt sich eine Struktur wie in Bild 3 dargestellt.

Die Aufgabe des Monitormoduls ist es, dabei die Entscheidung zu treffen, inwieweit zur Ausführung der Operation eine Kopplung nötig ist oder ob z.B. eine großräumige Transferbewegung mit der mobilen Plattform ausgeführt werden muß. Der folgende Text befasst sich mit der Umsetzung der regelungstechnischen Voraussetzungen für die bedarfsorientierte Kopplung von Manipulatoren und Plattform.

## 5 Regelung der Manipulatorposition in Weltkoordinaten

### 5.1 Mathematisches Modell

Das Konzept sieht vor, daß ein von einem Manipulator anzufahrender Punkt nicht explizit durch eine Vorgabe einer Trajektorie für Manipulator und Fahrzeug erreicht werden soll, sondern es wird einzig und allein die Trajektorie für den Manipulatoren vorgegeben, wobei die Plattform die Aufgabe hat, die Erreichbarkeit der Ziel-Punktes sicherzustellen. Die Position des anderen Manipulators soll in den hier betrachteten Fällen nicht verändert werden. Wie dabei die Bewegungsplanung für die mobile Plattform realisiert werden kann, ist Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten. Eine Voraussetzung für diese Art der Kopplung von Manipulatoren und mobiler Plattform ist, daß die Manipulatoren in Weltkoordinaten geregelt werden und nicht, wie sonst meist üblich, in einem mit der Plattform verbundenen Koordinatensystem. Im folgenden ist für einen Manipulator dargestellt, wie dies erreicht wird.



**Bild 3:** Struktur des Planungssystems für die bedarfsorientierte Kopplung

Die Transformation der Darstellung der Manipulatorposition in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem  $\vec{x}_M^P(t)$  zu der Darstellung in Weltkoordinaten  $\vec{x}_M^W(t)$  hängt von der momentanen Fahrzeugposition  $\vec{x}_p^W(t)$  ab und berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\vec{x}_M^W(t) = T(\vec{x}_p^W(t)) \vec{x}_M^P(t) = \vec{x}_{M,R}^W(t) \quad , \quad (1)$$

wobei  $T(\vec{x}_p^W(t))$  die von der momentanen Plattformposition abhängige homogene Transformationsmatrix ist. Der Manipulator soll in Weltkoordinaten eine vorgegebene Referenztrajektorie  $\vec{x}_{M,R}^W(t)$  abfahren, während die mobile Plattform Bewegungen zur Unterstützung dieses oder eines anderen Manipulators ausführt. Durch Umformung der obigen Gleichung erhält man folgende Position für den Manipulator in fahrzeugfesten Koordinaten, um diese Bedingung zu erfüllen:

$$\vec{x}_{M,R}^P(t) = T^{-1}(\vec{x}_p^W(t)) \vec{x}_{M,R}^W(t) \quad . \quad (2)$$

Die Referenztrajektorie in Weltkoordinaten läßt sich durch die Transformation der Position in fahrzeugfesten Koordinaten berechnen, wobei für die Fahrzeugposition



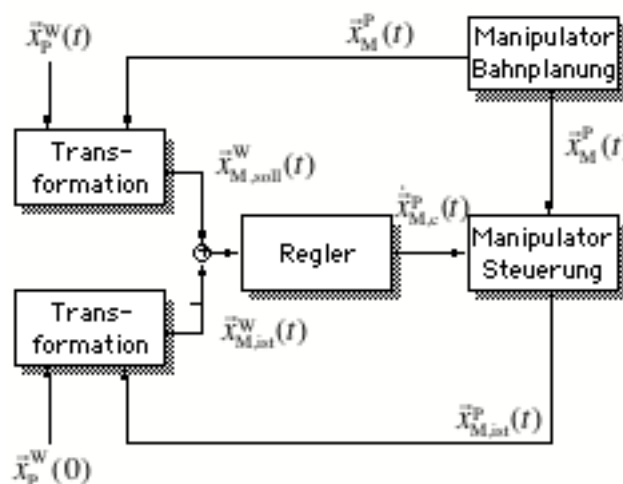
diejenige benutzt wird, die zu Beginn der gemeinsamen Bewegung vorlag. Damit ergibt sich insgesamt:

$$\vec{x}_{M,R}^p(t) = T^{-1}(\vec{x}_p^w(t)) T(\vec{x}_p^w(0)) \vec{x}_M^p(t). \quad (3)$$

Bei der Lösung nach Gln.(3) wird also die Bahn eines Manipulators in fahrzeugfesten Koordinaten durch Transformation der ursprünglichen Bahn berechnet und dadurch die Bewegung der mobilen Plattform kompensiert. Die unmittelbare Anwendung dieser Gleichung ist jedoch nur dann möglich, wenn die Manipulatoren und die mobile Plattform synchron angesteuert werden, da von beiden Systemen die Information über die aktuelle Position benötigt wird. Im folgenden wird aber davon ausgegangen, daß zwei unabhängige Teilsysteme miteinander gekoppelt werden sollen. Hintergrund ist, daß im allgemeinen die mobile Plattform und das Manipulatorsystem über unterschiedliche Antriebs- und Steuerungskonzepte verfügen. Die Steuerungssysteme arbeiten im allgemeinen asynchron und mit unterschiedlichen Taktzeiten. Für diesen Fall ist es erforderlich, eine Regelung einzusetzen, die Abweichungen durch den Asynchronismus ausregelt.

## 5.2 Asynchrone Einkopplung und Regelung

Im folgenden wird daher die Situation betrachtet, daß zwei Steuerungen (jeweils eine für die mobile Plattform und das Manipulatorsystem) gekoppelt werden müssen, die unterschiedliche Taktzeiten haben und asynchron arbeiten. Eine Möglichkeit zur Einkopplung von asynchronen Informationen ist es, aus diesen Informationen Geschwindigkeitsvorgaben abzuleiten. Bei direkter Einkopplung der Positionsinformation besteht die Gefahr, daß Unstetigkeiten in der Geschwindigkeit entstehen, und damit keine ruckfreie Bewegung mehr erzielt werden kann. Durch die Geschwindigkeitseinkopplung hat man in der offenen Wirkungskette keine definierte Kontrolle mehr über die Position, so daß eine Rückkopplung der Position und eine Regelung der Geschwindigkeitsvorgaben notwendig wird. Die realisierte Regelung hat die in Bild (1) dargestellte Struktur.



**Bild 4:** Struktur der Regelung

Die von der Manipulatorbahnplanung gelieferten Sollwerte werden durch eine Transformation in die Darstellung im Weltkoordinatensystem überführt, wobei für die Position der mobilen Plattform die Ausgangsstellung eingesetzt wird:

$$\vec{x}_{M,\text{soll}}^W(t) = T(\vec{x}_P^W(0)) \vec{x}_M^P(t) \quad (4)$$

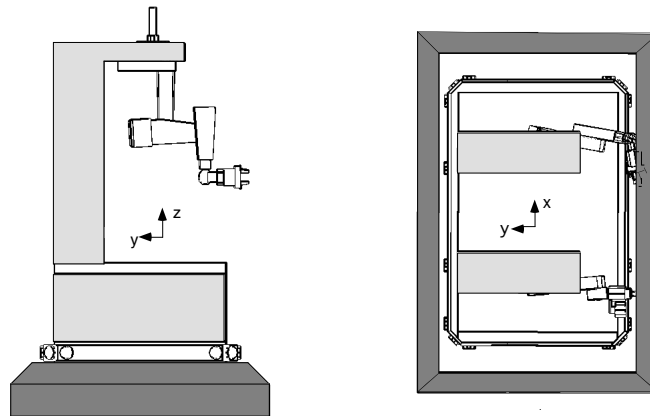
Die tatsächlich eingenommene Position hingegen berechnet sich nach:

$$\vec{x}_{M,\text{ist}}^W(t) = T(\vec{x}_P^W(t)) \vec{x}_{M,\text{ist}}^P(t) \quad (5)$$

Der Fehler  $\vec{e}(t) = \vec{x}_{M,\text{soll}}^W(t) - \vec{x}_{M,\text{ist}}^W(t)$  entsteht dadurch, daß in der Transformation der aktuellen Manipulatorposition Daten benutzt werden, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen wurden. Der nachgeschaltete Regler hat die Aufgabe, diesen möglichst klein zu halten.

## 6 Experimente

Zur Untersuchung, welche Genauigkeit mit dem oben vorgestellten Ansatz zur Regelung eines Manipulators in Weltkoordinaten erreicht werden kann, wurden einige Experimente durchgeführt. Die Testumgebung war der KAMRO (**K**arlsruher **A**utonomer **M**obiler **R**oboter). In der Abbildung 2 sind die Komponenten Zweiarmsystem und mobile Plattform sowie die benutzten Koordinatensysteme eingezeichnet.



**Bild 5:** Verwendete Koordinatensysteme

Es wurde der Fall untersucht, daß einer der beiden Manipulatoren in der anfänglichen Weltposition verharren sollte, während die mobile Plattform Bewegungen ausführte. Der zweite Manipulator wurde hier nicht betrachtet. Für den zu koppelnden Manipulator sollte also folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\vec{x}_{M,R}^W(t) = \vec{x}_M^W(0) \quad (6)$$

In Abbildung (6a) bis (6d) sind die Auslenkungen des Manipulators entlang der x-Achse des Weltkoordinatensystems über der Zeitachse aufgetragen. Da die Vorgabe war, daß der Manipulator die Anfangsposition halten sollte, sind diese Auslenkungen gleich dem absoluten Fehler. Es wurden Bewegungen der mobilen Plattform in x-Richtung mit unterschiedlichen Beschleunigungen untersucht. Das Geschwindigkeitsprofil der Plattformbewegung ist in Bild (6) dargestellt. Es zeigt sich, daß zu Beginn, in der Mitte und am Ende der Bewegungen durch den Sprung in der Beschleunigung Oszillationen entstehen, die durch die elastische Radaufhängung der mobilen Plattform begründet sind. Die Amplitude dieser Oszillation wächst mit steigender Beschleunigung.

Für die Messung dieses Fehlers wurde am TCP eines Manipulators ein Digitizer befestigt und dieser etwa 2mm über einem Graphiktablett verfahren. Auf diese Weise konnten 40 Positionsmessungen pro Sekunde mit einer Auflösung von 25  $\mu\text{m}$  durchgeführt werden. Dies ergab eine ausreichende Bandbreite um z.B die Schwingungen durch die elastische Radaufhängung der mobilen Plattform aufzulösen.

File Name : x2\_x.ps  
Creator : gnuplot

File Name : x1\_x.ps  
Creator : gnuplot

File Name : x3\_x.ps  
Creator : gnuplot

File Name : x5\_x.ps  
Creator : gnuplot

**Bild 6** Fehlerdiagramme

Mögliche Ursachen der gemessenen Fehler sind:

- Ungenauigkeiten der mobilen Plattform (vor allem in y-Richtung; bedingt durch den Schlupf der MECANUM-Räder und Fehler in der kinematischen Modellierung).
- Ungenauigkeiten des Manipulators; in erster Linie bedingt durch Fehler bei der kinematischen Modellierung.
- Fehler bei der Regelung; vor allem die dynamischen Fehler entstehen dabei durch die asynchrone Einkopplung und suboptimale Reglerparameter.

Es zeigt sich aber, daß bei hinreichend kleinen Beschleunigungen die Amplitude des Fehlers bei etwa 1 mm liegt. Weitere Verbesserungen können durch die Wahl eines geeigneten Reglers erreicht werden; eine entscheidende Verbesserung wird aber vor allem durch eine der Dynamik des Gesamtsystems angepaßten Interpolation für die Fahrzeugbewegung, die insbesondere Sprünge in der Beschleunigung vermeidet, erwar-

tet. Weitere Untersuchungen sollen dies belegen. Für die Anwendung wurde aus den Experimenten deutlich, daß die Bewegung der mobilen Plattform während einer Transferoperation des Manipulators unkritisch ist. Ob die Ausführung von Fügeoperationen während der Fahrt der Plattform möglich ist, wird sich in weiteren Experimenten zeigen.

## 7 Zusammenfassung

Auf dem Gebiet der autonomen mobilen Systeme trifft man immer häufiger auf mobile Fahrzeuge, auf denen Manipulatoren befestigt sind. In fast allen Fällen werden die mobile Plattform und die Manipulatoren als zwei getrennte Systeme betrachtet. Dieser Beitrag befasst sich mit der Kopplung von Manipulatoren und einer mobilen Plattform. Nach einer Analyse der möglichen Aufgabenstellungen für ein gekoppeltes Manipulator-Plattform-System wurden prinzipielle Verfahren für eine Kopplung beschrieben und miteinander verglichen. Es werden die drei Klassen, *lose Kopplung*, *bedarfsorientierte Kopplung* und *vollständige Kopplung* unterschieden. Für die bedarfsorientierte Kopplung wird ein neues Konzept vorgestellt und die Realisierung der regelungstechnischen Ebene für ein reales mobiles Zweiarm-Robotersystem beschrieben. Durch diese Form der Kopplung kann die Leistungsfähigkeit des Roboters erheblich erweitert werden. Die durchgeführten Experimente zeigen, daß die Schwierigkeiten, die mit der Kopplung zweier asynchroner und unterschiedlich getakteter Robotersteuerungen verbunden sind, auf der regelungstechnischen Ebene bewältigt werden können. Das beschriebene Konzept für die bedarfsorientierte Kopplung wird in zukünftigen Arbeiten vervollständigt.

## Danksagung

Diese Arbeiten wurde am Institut für Prozeßrechentechnik und Robotik, IPR (Prof. Dr.-Ing. U. Rembold, Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann) an der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe durchgeführt. Gefördert werden die Arbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 314 „Künstliche Intelligenz - Wissensbasierte Systeme“.

## Literatur

- [1] Chiu, Stephen L.: *Control of Redundant Manipulators for Task Compatibility*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1987, pp. 1718 - 1724.
- [2] Dubey, R. and Luh, J. Y. S.: *Redundant Robot Control for Higher Flexibility*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1987, pp. 1066 - 1072.
- [3] Jianwei Zhang, Michael Spreng, Klaus Hörmann: *Entwicklung eines Moduls zur Planung kollisionsfreier Bahnen für CATROB und KISMET*. Abschlußbericht ; Institut für Prozeßrechentechnik und Robotik, Universität Karlsruhe, Januar 1991.
- [4] Yoshio Yamamoto and Xiaoping Yun: *Control of Mobile Manipulators Following a Moving Surface*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, May 1993, pp. 1 - 6.

- [5] Jonathan Cameron, Douglas MacKenzie, Keith R. Ward, Ronald C. Arkin, Wayne J. Book: *Reactive Control for Mobile Manipulation*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, May 1993, pp. 228 - 235.
- [6] Norbert A. M. Hootsmans, Steven Dubowsky: *Large Motion Control of Mobile Manipulators Including Vehicle Suspension Characteristics*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, April 1991, pp. 2336 - 2341.
- [7] Steve H. Murphy, John T. Wen, George N. Saridis: *Analysis of Cooperating Robot Manipulators on a Mobile Platform*. Expert Systems and Robotics, F 71(1991), pp. 533 - 550.
- [8] Wayne F. Carriker, Pradeep K. Khosla, Bruce H. Krogh: *Path Planning for Mobile Manipulators for Multiple Task Execution*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3(1991), pp. 403 - 408.
- [9] W. Miksch, D. Schroeder: *Performance-Functional Based Controller Design for a Mobile Manipulator*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, May 1992pp. 227 - 232.
- [10] Homayoun Seraji: *An On-line Approach to Coordinated Mobility and Manipulation*. ICRA IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, May 1993, pp. 28 - 33.