

Rekonfigurierbare mobile Roboter

Reconfigurable mobile Robots

Dipl.-Ing. Mathias Brandstötter und Univ.-Prof. Dr. Michael Hofbaur
UMIT – Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik,
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, A-6060 Hall in Tirol, Österreich
{mathias.brandstoetter, michael.hofbaur}@umit.at

Kurzfassung

Der gegenwärtige Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) zeigt deutlich, wie heute mit Hilfe mobiler Roboter, Logistikaufgaben erfolgreich gelöst werden können. Im Allgemeinen handelt es sich bei derartigen Systemen aber um Transportsysteme mit nicht veränderbaren Fahrwerken. Die damit fest vorgegebene Systemgröße ist üblicherweise auf eine spezielle Logistikaufgabe optimal angepasst. Für Spezialanwendungen, insbesondere den Transport von Gütern unterschiedlichster Größe und Ausformung, sind derartige Transportfahrzeuge mit fest vorgegebener Systemgröße bzw. Fahrwerksgeometrie unter Umständen zu einschränkend. Als Alternative zu den bestehenden Systemen möchten wir ein rekonfigurierbares Robotersystem vorstellen. Unsere Lösung zeigt exemplarisch, wie aus modular aufgebauten Fahrwerkskomponenten, Transportplattformen mit unterschiedlichster Geometrie und Radanzahl konfiguriert werden können.

Abstract

The current use of automated guided vehicle systems (AGV) clearly shows how to solve logistic tasks using mobile robots. In general, such transport systems are equipped with non-adjustable chassis. The fixed, predetermined size of the system is generally adapted to optimally execute a special logistics task. For special applications, in particular the transport of goods of varying size and shape, transport vehicles with a fixed system size or suspension geometry may be too restrictive. We would like to introduce a reconfigurable robot system as an alternative to the existing systems. Our solution is a prime example of how modules can be configured with built-in chassis components, transport platforms with (varying, or alternative) geometry and differing numbers of wheels.

1 Einleitung

Die derzeit an die interne Logistik gestellten Herausforderungen sind überaus umfangreich. Aus diesem Grund verwundert es kaum, dass sich die eingesetzten Transportsysteme stark von einander in Form und Größe differieren. Schon bei der Betrachtung der höchst-zulässigen Nutzlast von FTS in Fertigungshallen, zeichnet sich dieses klare Bild ab. Wogegen beim Transportroboter Adam der Firma RMT Robotics eine maximale Transportlast von 150 kg nicht überschritten werden darf, weist Caesar der Firma MLR eine Traglast von bis zu 40.000 kg vor. Bei den Robotern kommen hierzu Fahrwerke mit Differential-Drive oder Ackermann Lenkung, omnidirektionale Fahrwerke mit sogenannten Mecanum Rädern sowie Fahrwerke mit gelenkten Standardrädern zur Anwendung. Der entscheidende Vorteil omnidirektionaler Fahrwerke ist, dass das Gut nicht nur entlang eines gewünschten Pfades befördert werden kann, sondern auch dessen Ausrichtung stets frei wählbar ist. Eine derartige Plattform (omniMove) wird zum Beispiel von der Firma Kuka angeboten.

Eines haben die genannten FTS gemein, ihre mangelnde Flexibilität bei einer ausgeprägten Veränderung der Transportaufgabe. Einerseits müssen sie auf das größte Transportgut ausgelegt werden und es kann andererseits

bei einer signifikant inhomogenen Gewichtsverteilung des Transportgutes keine homogene Lastverteilung auf die einzelnen Räder des Transportsystems gewährleistet werden. Sowohl Langgüter als auch Lasten mit inhomogener Gewichtsverteilung bereiten Probleme und lediglich eine Auslegung des Transportfahrzeuges auf den ungünstigsten Fall, kann dem entgegen wirken. Sind kurzzeitig „Losgröße 1“-Transporte mit geringer Ausformung und geringerem Gewicht gefordert (bspw. eine Kurbelwelle), sind die bestehenden Systeme oft nicht für diese Anforderung wirtschaftlich einsetzbar.

Einen alternativen Ansatz, der sich von den oben beschriebenen Problemen löst, möchten wir hier vorstellen. Unsere Lösung stellt dabei die Möglichkeit zur Verfügung, die Größe des Transportsystems frei zu wählen. Dabei inkludiert sind darüber hinaus auch die freie Wahl der Radanzahl und deren Positionen. Dadurch erhält man jene benötigte Flexibilität, wenn ein FTS gefordert wird, das veränderliche Transportgüter befördern soll. Dies gelingt durch den Einsatz eines modularen Robotersystems. Das Transportsystem kann hierzu aus einem oder mehreren Fahrwerksteilen bzw. Robotern bestehen, welche im Verbund ein speziell ausgeformtes Fahrwerk für eine geforderte Transportaufgabe realisieren. Ergänzt wird diese Vielseitigkeit durch die Möglichkeit der Hinzunahme drehgelenkter Verbindungen bei der Beförderung des Transportguts.

Neben den rekonfigurierbaren elektro-mechanischen Komponenten ist auch eine ähnlich flexibel handhabbare Regelung für unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen bzw. Multi-Roboter Systeme von großer Bedeutung. In unserem Beitrag möchten wir daher einen Lösungsansatz für die verteilte Regelung solch flexibler aber auch komplexer Fahrwerke vorstellen.

2 Modulares Robotersystem

Als Versuchsplattform für die Realisierung von unterschiedlichen Fahrwerks- und Multi-Roboter Konfigurationen wurde ein modularer Roboter mit sechseckförmiger Modulausprägung, siehe **Bild 1**, realisiert [1]. Ein Rad-Modul implementiert hierbei ein mechatronisches Gesamtsystem, bestehend aus Radaufhängung, Lenk- und Antriebsaktuierung und der zugehörigen Leistungselektronik. Die Rad-Module sind so ausgelegt, dass sowohl angetriebene Standardräder, als auch omnidirektionale Räder verwendet werden können. Schwenkräder werden als unangetriebene Stützräder verwendet und an Zwischenmodulen verbaut. Um die geometrische Ausformung des Roboters auf einfache und kostengünstige Weise variieren zu können, stehen genau diese Zwischenmodule zur Verfügung. Sie bieten ausreichend Platz um z. B. Steuerprozessoren oder Sensorelemente aufzunehmen. Die für den Betrieb zuständige Echtzeit-Recheneinheit kann zentral für den gesamten Modulverbund bzw. Roboter ausgelegt sein oder aber auch verteilt, mit jeweils einer Recheneinheit pro Rad-Modul.

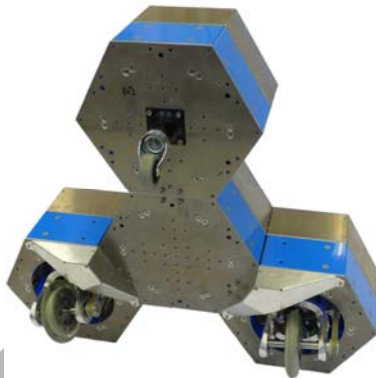


Bild 1 Roboter Prototyp

Die Vielfalt der Zusammenschlussmöglichkeiten ist groß und somit ist die Realisierung jeder gewünschten bzw. benötigten Fahrwerksgeometrie mit wenigen Einschränkungen gegeben. Es kann dabei Bedacht auf die Ladungsgeometrie als auch auf eine wesentliche inhomogene Gewichtsverteilung genommen werden. Im untenstehenden **Bild 2** werden einige Kombinationen veranschaulicht und auch ein Zusammenschluss von zwei Transportrobotern angedeutet.

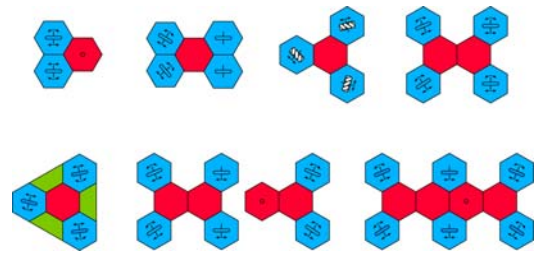


Bild 2 Roboterkonfigurationen

Schließen sich mehrere Transporteinheiten zu einem Gesamtsystem zusammen oder vereinigen sie sich indirekt über das Ladegut, wird das so entstandene Multi-Roboter-System über die von uns entworfene Regelungsarchitektur analysiert und, der Kinematik des Gesamtsystems entsprechend, für ausführbare Fahrbefehle freigegeben. Diese starre Formationsfahrt eines Multi-Roboterfahrwerks wird über die Generierung eines gemeinsamen Koordinatensystems, gekoppelt über die einzelnen Roboter, umgesetzt.

3 Modell-programmierte verteilte Regelung

Die Regelung eines Fahrwerkes für einen mobilen Roboter beinhaltet (implizit) die Rückwärtskinematik des jeweiligen Fahrwerkes, um eine Geschwindigkeitsvorgabe in die entsprechende Aktuierung (Lenkwinkel und Raddrehzahl) umzurechnen. Im Gegensatz zu diesem Ansatz schlagen wir eine Regelung vor, welche auf der Basis einer Fahrwerksmodellspezifikation (Geometrie und Funktionalität) die Rückwärtskinematik und damit verbunden auch die Manövrierfähigkeit des Fahrwerkes im Regler berechnet. Dadurch wird die Verwendung eines einheitlichen Reglers für alle realisierbaren Fahrwerke möglich. Der Regler muss lediglich durch die Spezifikation eines entsprechenden Fahrwerkmodells konfiguriert werden. Hauptaugenmerk bei der algorithmischen Formulierung der Berechnung der Kinematik war ein möglichst effizienter Lösungsalgorithmus, welcher die Auswertung zur Laufzeit des Reglers ermöglicht [2]. Damit ist auch eine on-line Rekonfiguration im Fehlerfall (z. B. Ausfall eines Lenkaktuators) sehr einfach handhabbar. Es gelingt in vielen Fehlerfällen, trotz Auswirkungen auf die Manövrierbarkeit, die Pfadtreue sicherzustellen, wodurch zum Beispiel das sichere Anfahren einer Servicestation auch im Falle des Vorhandenseins eines Defekts möglich wird. Auch kann eine Änderung der Fahrwerksgeometrie und der Anzahl der Räder damit zur Reglerlaufzeit behandelt werden. Dies ist unter anderem dann bedeutsam, wenn sich durch das Ausfahren von zusätzlichen Stützrädern zur Traglaststeigerung, das Fahrwerk des FTS verändert.

Bild 3 zeigt die eingesetzte Regelungsarchitektur für einen einzelnen Roboter. An unterster Stelle befindet sich die Regelung der Radeinheiten (Drive Units), die die Antriebs- und Lenkmotoren regelt. Der Datenaustausch zur

nächsthöher gelegenen Ebene erfolgt über das Radeinheiten-Netzwerk. In dieser Ebene befindet sich der *modellbasierte Regelungsalgorithmus*. Es werden hier die von den Radeinheiten kommunizierten Modellfragmente zur Modellbildung herangezogen, um das vorliegende Fahrwerksmodell zu berechnen. Eine Diagnoseeinheit zur Feststellung des jeweils gültigen Betriebs- bzw. Fehlerzustandes der Radeinheiten, dient zur Berechnung der jeweilig gültigen Fahrwerkskinematik. Ob ein geforderter Fahrbefehl tatsächlich umgesetzt werden kann oder ob dieser gegebenenfalls auf einen Gültigen rekonfiguriert werden muss, wird in der erwähnten Kinematik Reasoning Unit entschieden. Eine Regeleinheit für die synchrone Aktuierung der einzelnen Räder im Fahrwerk (coordinated control unit) sorgt unter anderem dafür, dass der Fahrbefehl unter Einhaltung der dynamischen Beschränkungen aller für die Bewegung notwendigen Motoren ausgeführt wird. In der obersten Ebene wird der Pfad des Roboters geplant, wobei auch schon hier der Fahrbefehl auf seine Ausführbarkeit hin geprüft werden kann.

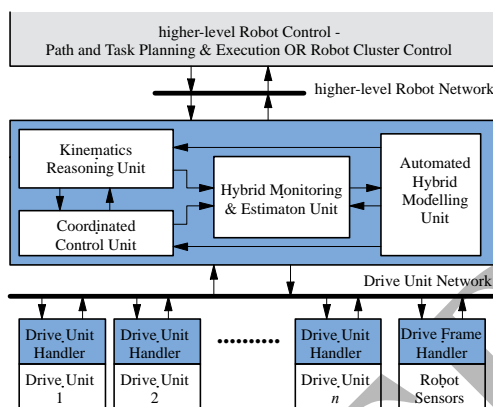


Bild 3 Regelungsarchitektur für einen Einzelroboter

Als weiteren Schritt zur Regelung von komplexen Roboterfahrwerken und insbesondere von in Formation fahrenden Multi-Roboter Konfigurationen (z. B. zum gemeinsamen Lasttransport) wurde nun der Lösungsalgorithmus zur Berechnung der Fahrwerkskinematik als verteilter Algorithmus formuliert. Diese Erweiterung, wie sie in **Bild 4** dargestellt ist, ermöglicht eine verteilte bzw. hierarchische Reglerarchitektur zur Kontrolle eines Verbundes. Jeglicher Zusammenschluss, bestehend aus einzelnen aktuierten Rädern, einzelnen Robotern erweitert um einzelne Räder oder aber mehreren in Verbindung stehenden Robotern mit möglicherweise inhomogenen Fahrwerksgeometrien bzw. -funktionalitäten, kann damit geregelt werden.

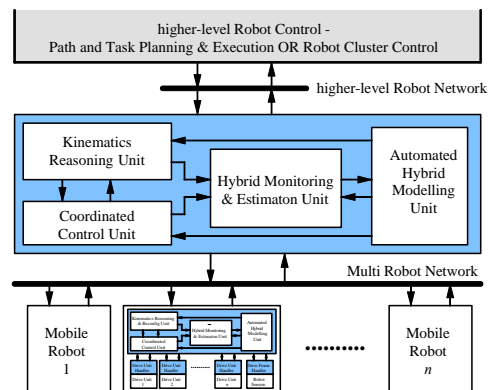


Bild 4 Regelungsarchitektur einer Multi-Roboter Konfiguration

Kern des vorgestellten Algorithmus ist die Berechnung des *zulässigen und aktuierten Bewegungsraumes* \mathbf{B} für den Fahrwerksverbund. Zu diesem Zweck wurden die Berechnungsmethoden aus [2] für Multi-Robotersysteme formuliert und in die verteilte Regelung integriert. Die Funktionsweise und Flexibilität dieses *Modellprogrammierten Regelungskonzeptes* wird mittels des vorgestellten modularen Robotersystems demonstriert.

Eine übergeordnete Regelung bzw. Pfad-Planung für den Roboter spezifiziert üblicherweise einen Fahrbefehl in dem die translatorischen Bewegungen \dot{x} und \dot{y} und die Drehbewegung des Roboters $\dot{\theta}$ (alle bezüglich des lokalen Roboterbezugssystems) vorgegeben wird. Damit ein Fahrbefehl $\dot{\xi} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]$ nun ausführbar ist, muss gelten:

$$\dot{\xi} \in \mathbf{B} . \quad (1)$$

Liegt $\dot{\xi}$ nicht im Raum der zulässigen und steuerbaren Bewegungen, bspw. im Fehlerfall eines omnidirektionalen Fahrwerkes oder bei falscher Anforderung an ein Differential-Fahrwerk, kann er zumeist in einen ausführbaren Befehl $\dot{\xi}^*$ rekonfiguriert werden. Veranschaulicht wird dieser Sachverhalt in **Bild 5**, in welchem der Raum \mathbf{B} als Ebene visualisiert wird. Die Projektion des geforderten Fahrfehls bezüglich seiner translatorischen Bewegungen auf den Raum \mathbf{B} der ausführbaren Befehle bewirkt eine Sicherstellung der Pfadtreue des Roboters. Der Freiheitsgrad der Drehung bzw. Drehgeschwindigkeit muss dabei aber aufgegeben werden.

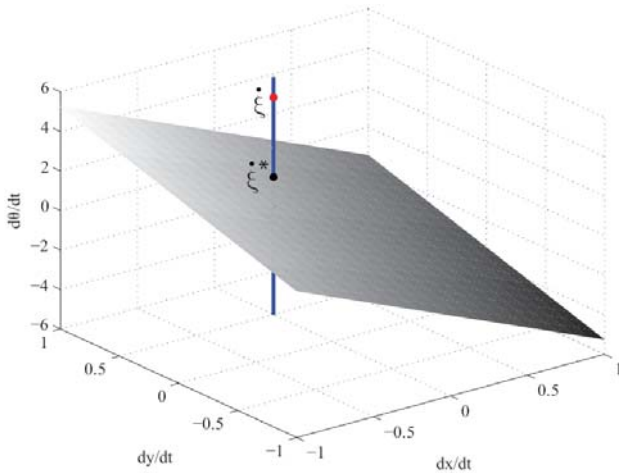


Bild 5 Rekonfiguration des Fahrbefehls $\xi̇$ zu $\xi̇^*$

4 Regelung von Multi-Roboter Systemen

Im Folgenden werden wir uns näher jener Aufgabe widmen, welche sich mit Multi-Roboter Systemen befasst. Speziell wird dabei der Verbund mehrerer Transportsysteme in starrer Formation als auch über eine drehgelenkte Verbindung betrachtet. Schon in [3] wurde eine Spezialform dieser Aufgabenstellung näher betrachtet, wobei diese Multi-Roboter Konfiguration (OmniMate) mit zwei durch Drehgelenke verbundenen Einzelrobotern realisiert ist. Es handelt sich konkret um zwei Differential-Fahrwerke, deren Gelenkdrehpunkte direkt auf den Radachsen liegen. In [4] wird eine omnidirektionale Plattform präsentiert, die ihre Bewegungsfreiheit durch drei an der Plattform befestigte Schwenkräder erlangt. Ein Lösungsvorschlag für den kooperativen Lasttransport von zwei Differential-Drive Robotern, die jeweils mit einem Doppelgelenk ausgestattet sind, findet sich in [5] beschrieben. Bei der Umsetzung in der Praxis ist die Verwendung von Winkelsensoren zwingend erforderlich, um die relative Verdrehung der jeweiligen Systeme zueinander zu kennen. **Bild 6** skizziert zunächst zwei Roboter sowohl in getrennter als auch in gekoppelt Anordnung.

Um einen Roboterverbund steuern zu können, ist es als Erstes notwendig, ein für alle beteiligten Systeme gemeinsames Koordinatensystem Σ_m^* zu definieren. In **Bild 6b** ist der Mittelpunkt der Konfiguration zugleich auch das frei gewählte Zentrum O_m^* von Σ_m^* . Ein von der übergeordneten Regelungsinstanz geforderter Fahrbefehl ξ_m^* bezieht sich auf dieses Zentrum und muss auf die einzelnen Teilsysteme umgerechnet werden. Konkret wird eine Transformationsvorschrift von $O_m^* \rightarrow O_i$ für jeden Roboter benötigt.

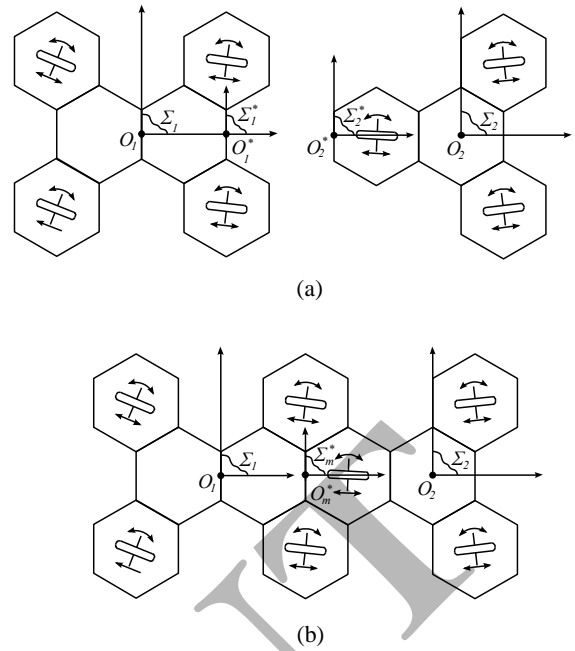


Bild 6 Starre Verbindung zweier Roboter

Zu diesem Zweck wird der Fahrbefehl mit einer Transformationsmatrix $T_{S,i}$ linksmultipliziert, die sich aus einem translatorischen Anteil $T_{t,i}$ und einem rotatorischen Anteil $T_{\gamma,i}$ zusammensetzt.

$$\xi_i = T_{\gamma,i} \cdot T_{t,i} \cdot \xi_m^* = T_{S,i} \cdot \xi_m^* \quad (2)$$

Die jeweiligen Transformationsmatrizen

$$T_{\gamma,i} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & \sin \gamma_i & 0 \\ -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

und

$$T_{t,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{p,i} \\ 0 & 1 & x_{p,i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

beinhalten die relativen Bezüge ($x_{p,i}$, $y_{p,i}$ und γ_i) vom i -ten Roboterkoordinatensystem Σ_i zu Σ_m^* .

Die exakt gleiche Vorgangsweise ist auch dann anwendbar, wenn die Einzelroboter des Multi-Roboter Systems nicht physikalisch miteinander verbunden sind. Die Wahl der Lage für das gemeinsame Koordinatensystem ist nach wie vor frei und stellt zugleich den Ausgangspunkt für sämtliche Fahrbefehlstransformationen dar. Werden all diese in Formation fahrenden Roboter zum kollektiven Transport eines Gutes eingesetzt, hat dies keine Auswirkung auf die Kinematik der Fahrwerke bzw. auf die einzelnen berechneten Fahrbefehle.

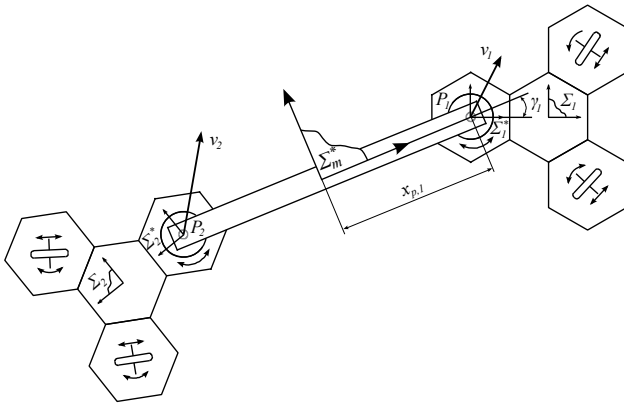


Bild 7 Verbund zweier Roboter mit Drehelement

Befindet sich zwischen dem Transportgut und dem Einzelroboter, wie in **Bild 7** dargestellt, eine drehbare Verbindung, bspw. ein Drehteller oder ein Drehgelenk, muss die in Gleichung 2 beschriebene Transformation des Fahrbefehls geringfügig erweitert werden. Aufgrund der Verwendung eines Drehelements ist ein Freiheitsgrad des Roboterfahrwerkes unabhängig von der Anforderung. Es muss eine Festlegung für eine der drei Geschwindigkeiten \dot{x}_i, \dot{y}_i oder $\dot{\theta}_i$ für den Roboter \mathbf{R}_i erfolgen, um einen gültigen Fahrbefehl zu generieren. Die Vorgabe der Geschwindigkeit im Punkt P_i des Fahrwerks muss dabei stets erfüllt werden. Um eine unaufhörliche Drehung des Roboters um den Punkt P_i während der Fahrt zu verhindern, kann $\dot{\theta}_i = 0$ gewählt werden. Dadurch kommt es zu einer reinen Translationsbewegung des Roboters \mathbf{R}_i in Richtung des Geschwindigkeitsvektors $v_i = [\dot{x}_i \ \dot{y}_i]^T$. Eine etwaige Drehung des Transportgutes relativ zum Roboter wird über den Drehteller ausgeglichen. Die zugehörige Geschwindigkeits-Transformationsvorschrift $T_{J,i}$ ergibt sich aus

$$\dot{\xi}_i = M_v \cdot T_{S,i} \cdot \dot{\xi}_m^* = T_{J,i} \cdot \dot{\xi}_m^* \quad (5)$$

wobei durch

$$M_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

die Drehgeschwindigkeit des Roboters \mathbf{R}_i zu Null gesetzt wird. Eine Fahrbefehlstransformation von Σ_i^* nach Σ_i ist aufgrund der nun ausschließlichen Translationsbewegung nicht notwendig und kann somit entfallen, da $\dot{\xi}_i^* = \dot{\xi}_i$ gilt.

Bei Auftritt eines Fehlers in einem Radmodul verändert sich der Raum der zulässigen und aktudierbaren Bewegungen des betroffenen Roboterfahrwerkes und dadurch auch die Bewegungsfähigkeit des Gesamtfahrzeuges. Die Informationen des Defektes wird über das Multi-Roboter Netzwerk (siehe **Bild 4**) dem modellbasierten Regler kommuniziert. Dieser wird versuchen, durch die oben beschriebene Rekonfigurationsvorschrift, einen gültigen Fahrbefehl zu ermitteln.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde darauf hingewiesen, wie derzeit Transportroboter im industriellen Umfeld eingesetzt werden und auf welche Grenzen man damit stößt. Aus diesen Einschränkungen heraus resultiert unsere Motivation, eine von der Art und Größe des Transportguts unabhängige Lösung für ein flexibles fahrerloses Transportsystem zu finden. Es wurde gezeigt, dass man mit modular aufgebauten Multi-Robotersystemen im Stande ist, ein der jeweiligen Aufgabe passendes Transportfahrzeug zur Verfügung zu stellen. Mit der von uns entwickelten modellbasierten Regelung gelingt es, die Vielfalt an möglichen Konfigurationen des Robotersystems handhaben zu können. Das für die aktuelle Roboterzusammensetzung gültige kinematische Fahrwerkmodell, ergibt sich aus den gegenwärtigen geometrischen Parametern des Fahrwerks und der derzeitigen Betriebszustände der Antriebsmodule. Auch bei direkter oder indirekter Vereinigung mehrerer Transportplattformen kann mithilfe der modellbasierten Regelung für Multi-Roboter Systeme über Generierung eines gemeinsamen Roboterkoordinatensystems der gültige Bewegungsraum bestimmt werden.

6 Danksagung

Forschungsfinanzierung durch den österreichischen Forschungsfonds FWF unter Projekt P20041-N15.

7 Literatur

- [1] Hofbauer, M.; Brandstätter, M.; Jantscher, S.; Schörghuber, Ch.: *Modular Re-Configurable Robot Drives*. 2010 IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM 2010), Singapore, June 2010.
- [2] Hofbauer, M.; Brandstätter, M.; Schörghuber, Ch.; Steinbauer, G.: *On-line Kinematics Reasoning for Reconfigurable Robot Drives*. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010), Anchorage, USA, May 2010.
- [3] Borenstein, J.; Evans, J.: *The OmniMate Mobile Robot – Design, Implementation, and Experimental Results*. 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1997), Albuquerque, USA, 1997.
- [4] Doebbler, J.; Davis, J.; Junkins, J.; Valesek, J.: *Odometry and Calibration Methods for Multi-Castor vehicles*. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, USA, 2008.
- [5] Abou-Samah, M.; Tang, C.; Bhatt, R.; Krovi, V.: *A kinematically compatible framework for cooperative payload transport by nonholonomic mobile manipulators*. Autonomous Robots, Volume 21, Number 3, Springer Science + Business Media, 2006.