

Odometriebasierte Fehlerdiagnose für quasiomnidirektionale mobile Radroboter

Theresa Rienmüller,* Christoph Gruber, Michael Hofbauer
UMIT,

Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Bioengineering,
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1a, Hall in Tirol

theresa.rienmueller@umit.at,† christoph.gruber@umit.at
michael.hofbauer@umit.at

1 Einleitung

Der Einsatz eines mobilen Radroboters beinhaltet normalerweise die Vorgabe, eine gewisse Strecke abzufahren, bzw. ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Um diese Aufgabe ohne direkte Einwirkung des Menschen erfüllen zu können, muss der Roboter einerseits wissen, wo er sich selbst befindet und andererseits selbstständig erkennen können, ob ein Fehler in seinem Selbstlokalisierungssystem oder gar ein mechanischer Defekt im Fahrwerk vorliegt. Die Wahrscheinlichkeit eines mechanischen Defekts ist zwar relativ gering, dennoch ist die Auswirkung auf die Aufgabe des Roboters mitunter fatal: Auf der einen Seite kann ein unentdeckter Ausfall zu weiteren Beschädigungen des Roboters oder gar zur Verletzung ihn umgebender Personen führen. Auf der anderen Seite kann die Mission ohne eine mögliche Rekonfiguration nicht mehr weiterverfolgt werden. Doch nicht nur schwerwiegende Defekte beeinflussen den Roboter auf dem Weg zu seinem Ziel. Mitunter reichen bereits kleine Störungen oder Fehler aus, um die Qualität der Schätzung der eigenen Position und Orientierung drastisch zu verschlechtern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, sowohl diese Störungen als auch die mechanischen Defekte zu erkennen und einer bestimmten Komponente im Roboter zuzuordnen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf Robotern mit mehreren gelenkten Standardrädern. Solche Roboter haben den Vorteil, dass sie, nach Ausrichtung der einzelnen Räder, in jede beliebige Richtung fahren können. Die Herausforderung liegt hierbei in der Einhaltung der kinematischen Beschränkungen, das bedeutet in der exakten Abstimmung der Lenkwinkel und Raddrehzahlen. Anhand der von den Gebern gelieferten Messwerte muss wieder auf die Geschwindigkeit des Roboters geschlossen werden, um seine momentane Position bestimmen zu können. Da diese Abstimmung in einem realen System niemals perfekt sein wird, ist auch diese Umkehrung des

*Doctoral School Informations- und Kommunikationstechnologie, TUGraz, Rechbauerstrasse 12, 8010 Graz

†Korrespondenz bitte an diese Adresse

Problems nicht ganz einfach. Mit Hilfe der sich aus den Messwerten ergebenden Diskrepanzen in der Geschwindigkeitsschätzung des Roboters, sowohl einzelner Radpaare untereinander als auch gegenüber der Vorgabe, kann auf Defekte im Fahrwerk geschlossen werden.

Im nächsten Kapitel werden zunächst einige Arbeiten, die sich mit dem Thema der Fehlererkennung für mobile Roboter beschäftigen, vorgestellt. Danach wird auf die Besonderheiten der Kinematik quasiomnidirektionaler Roboter eingegangen und es werden verschiedene Betrachtungsweisen der kinematischen Gleichungen vorgestellt. Im vierten Kapitel werden schließlich mögliche Fehlerfälle vorgestellt und der Diagnosealgorithmus erläutert. Kapitel fünf beschreibt die verwendete Konfiguration unserer Roboterplattform und liefert experimentelle Ergebnisse.

2 Verwandte Arbeiten

Für die Aufgabe der Fehlererkennung von Radrobotern gibt es mehrere interessante Ansätze. Einerseits wurden modellbasierte Verfahren entwickelt, die für jeden betrachteten Fehlerfall ein dezidiertes Modell beinhalten und anhand dessen den Zustand des Roboters zu schätzen versuchen [12, 3]. Auf der anderen Seite wurden Algorithmen entwickelt, die auf dem Vergleich mehrerer Sensoren basieren [10, 2]. Keiner dieser Ansätze beschäftigt sich jedoch näher mit den kinematischen Beschränkungen des Roboters und den Auswirkungen eines Fehlers auf das gesamte Fahrwerk. Dies liegt zum Großteil darin begründet, dass es sich bei den betrachteten Roboterfahrwerken meist um einfachere Fahrwerke, wie beispielsweise solche mit Differentialantrieb, handelt.

3 Die Kinematik quasiomnidirektionaler mobiler Radroboter

Ein omnidirektionaler Roboter zeichnet sich dadurch aus, dass er zu jeder Zeit aus dem Stand in jede beliebige Richtung losfahren kann. Bei einem quasiomnidirektionalen Roboterfahrwerk ist für die Fahrt in eine beliebige Richtung i.A. eine vorherige Ausrichtung der Räder notwendig. In dieser Arbeit beschäftigen wir uns mit ebensolchen Robotern mit einer Radanzahl von $n \geq 3$. In Abbildung 1 ist beispielhaft ein Roboter mit $n = 3$ Rädern in seinem lokalen Koordinatensystem $\Sigma_R : \{0_R; x_R, y_R\}$ abgebildet. Die Anordnung der Räder wird dabei durch deren Aufstandspunkt in Polarkoordinaten in Σ_R beschrieben, wobei l_i den Abstand des Aufstandspunktes des i -ten Rades vom lokalen Koordinatenursprung und α_i den Winkel zur x_R -Achse beschreibt. Des Weiteren spielt natürlich der Radradius r_i eine wichtige Rolle bei der Berechnung der Robotergeschwindigkeit, ebenso wie die mit der Zeit veränderlichen Größen β_i und $\dot{\phi}_i$, der Lenkwinkel bzw. die Raddrehzahl.

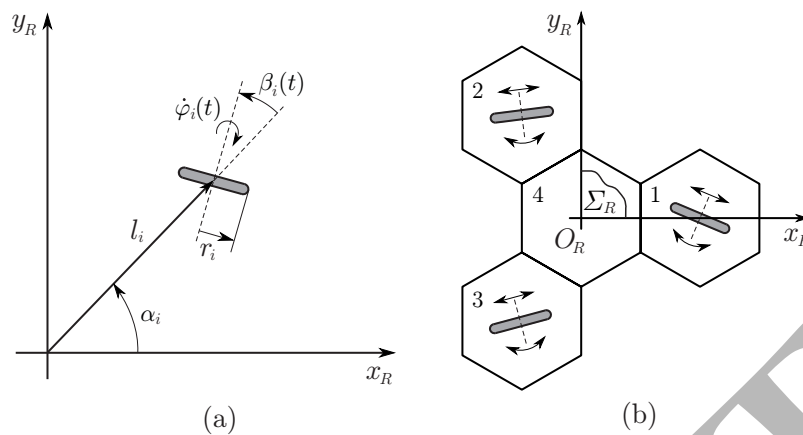


Abbildung 1: a) Parameter eines Rades im lokalen Koordinatensystem des Roboters. b) Der Roboter in seinem lokalen Koordinatensystem.

Die Geschwindigkeit des Roboters setzt sich aus der Bewegung in Richtung x_R und y_R zusammen (translatorische Komponente), sowie aus der Drehung um die Hochachse. Die Geschwindigkeit des Roboters relativ zu einem globalen Koordinatensystem, ausgedrückt im lokalen Koordinatensystem Σ_R wird damit zu:

$$\xi = [\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\theta}_R]^T \quad (1)$$

Diese Bewegung kann auch als reine Drehbewegung um einen sogenannten Momentanpol beschrieben werden. Dieser Punkt berechnet sich im lokalen Koordinatensystem des Roboters anhand der Geschwindigkeitsinformation wie folgt:

$$MP_R = \begin{bmatrix} x_{MP} \\ y_{MP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{y}_R / \dot{\theta}_R \\ \dot{x}_R / \dot{\theta}_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

Geometrisch betrachtet bedeutet das, dass sich alle Radachsen des Roboters in genau diesem Punkt schneiden (siehe Abb. 2).

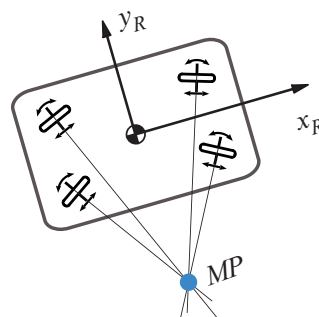


Abbildung 2: Der Momentanpol der Bewegung als Schnittpunkt der Radachsen.

Das kinematische Modell für einen solchen Roboter kann über die sogenannten Roll- und Gleitbedingungen abgeleitet werden [4]. Für ein Rad i des Roboters beschreibt die Rollbedingung

$$\begin{aligned} r_i \dot{\phi}_i &= [\sin(\alpha_i + \beta_i) \quad -\cos(\alpha_i + \beta_i) \quad -l_i \cdot \cos(\beta_i)] \cdot \xi \\ &= \mathbf{j}_i^T(\beta_i) \xi \end{aligned} \quad (3)$$

den Zusammenhang zwischen dem Lenkwinkel und der Raddrehzahl mit der Geschwindigkeit des gesamten Roboters. Diese Bedingung beschreibt die ideale Rollbewegung eines Rades normal zur Radachse. Zusätzlich dazu stellt die sogenannte Gleitbedingung sicher, dass die Geschwindigkeit des Roboters bezogen auf das betrachtete Rad keine Komponente quer zur Abrollebene, d.h. in Richtung der Radachse ausführt:

$$\begin{aligned} 0 &= [\cos(\alpha_i + \beta_i) \quad \sin(\alpha_i + \beta_i) \quad l_i \cdot \sin(\beta_i)] \cdot \xi \\ &= \mathbf{c}_i^T(\beta_i) \xi . \end{aligned} \quad (4)$$

Da der Roboter üblicherweise über mehr als ein Rad verfügt, werden diese Gleichungen nun für alle n Räder zusammengefasst. Dabei werden die einzelnen Zeilenvektoren $\mathbf{j}_i^T(\beta_i)$ zeilenweise in die Matrix $\mathbf{J}_1(\beta)$ eingefügt. β beschreibt dabei den Spaltenvektor aller Lenkwinkel β_i . Auf dieselbe Art wird auch die Matrix für die Gleitbedingungen aufgebaut. Die Zeilenvektoren $\mathbf{c}_i^T(\beta_i)$ werden zur Matrix $\mathbf{C}_1(\beta)$ zusammengefasst. Daraus ergeben sich die Roll- und Gleitbedingungen in Matrixschreibweise:

$$\mathbf{J}_2 \dot{\phi} = \mathbf{J}_1(\beta) \xi \quad (5)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_1(\beta) \xi \quad (6)$$

\mathbf{J}_2 ist dabei eine konstante Diagonalmatrix mit den Radradien als Einträge in der Hauptdiagonale. $\mathbf{C}_1(\beta)$ und $\mathbf{J}_1(\beta)$ sind jeweils $n \times 3$ Matrizen. Anhand von Gleichung 6 erkennt man, dass die Gleitbedingung erfüllt ist, wenn $\xi \in \text{null}(\mathbf{C}_1(\beta))$. Koordiniert man die Lenkwinkel so, dass $\text{rang}(\mathbf{C}_1(\beta)) = 2$, dann gilt $\dim(\text{null}(\mathbf{C}_1(\beta))) = 1$ und es verbleibt ein Freiheitsgrad für die Vorgabe von ξ .

Geometrisch betrachtet entspricht diese Bedingung dem Umstand, dass sich alle Radachsen des Roboters in genau einem Punkt schneiden (siehe Abb. 3a)). Dieser Punkt entspricht dann dem Momentanpol und die Bewegung des Roboters ergibt sich durch die Vorgabe der Rotationsgeschwindigkeit um diesen Punkt. Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Abstimmung schneiden sich in Wirklichkeit nicht alle Radachsen in genau einem Punkt (siehe Abb. 3b). Der Momentanpol der *tatsächlichen* Bewegung des Roboters ist dadurch nicht mehr eindeutig durch den Schnittpunkt aller Achsen bestimmbar.

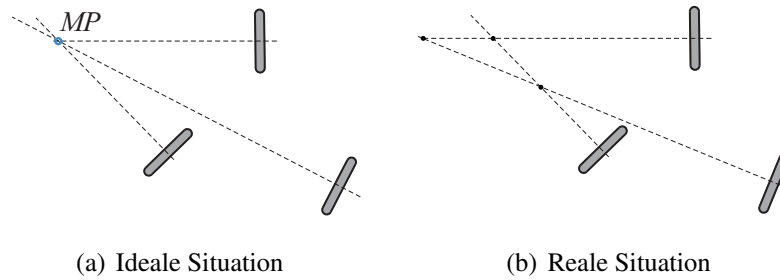
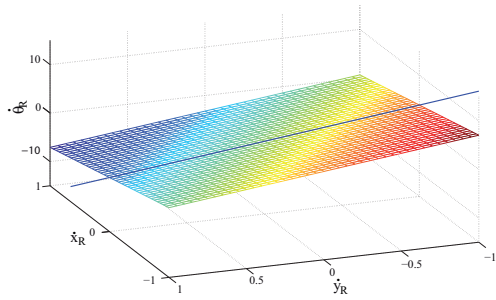


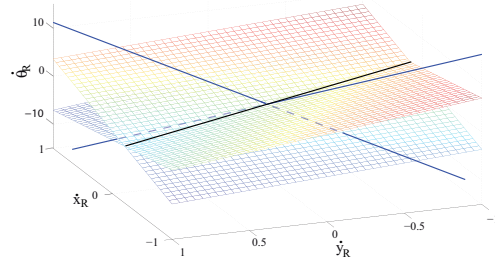
Abbildung 3: Schnittpunkt der Radachsen. (a) Ideale Situation: Alle Achsen schneiden sich in einem Punkt. (b) Reale Situation: Ein Rad ist nicht optimal ausgerichtet. Dies führt zu drei verschiedenen Schnittpunkten.

3.1 Der Geschwindigkeitsraum

Ein wesentlicher Nachteil der Betrachtung der Bewegung des Roboters mit Hilfe des Momentanpols in der (x_R, y_R) -Ebene stellt der Verlust der Geschwindigkeitsinformation dar, da dieser lediglich die Lage des Drehpunktes, nicht aber die Drehgeschwindigkeit um diesen Punkt definiert (siehe auch Gleichung 2). Aus der Lage des Momentanpols alleine kann die Bewegung des Roboters daher nicht mehr eindeutig rekonstruiert werden. Um eine Aussage über die möglichen Geschwindigkeiten, die ein Roboter mit einer gegebenen Radkonfiguration fahren kann, treffen zu können, wird daher der sogenannte Geschwindigkeitsraum eingeführt, dessen Achsen die entsprechenden Geschwindigkeiten darstellen: $\{0_\xi; \dot{x}_R, \dot{y}_R, \dot{\theta}_R\}$. Betrachtet man nun in diesem Raum welche Bewegungen der Roboter ausführen kann, erkennt man, dass alle möglichen Bewegungen des Roboters, für die die Gleitbedingung für *ein* gelenktes Standardrad (Gl. 4) nicht verletzt wird, einer Ebene in diesem Raum entsprechen. Bei einer Veränderung des Lenkwinkels β_i von Rad i , wird diese Ebene um eine Achse, die durch 0_ξ verläuft gedreht. Die Richtung dieser Achse wird durch die Koordinaten des Radaufstandspunktes in Σ_R bestimmt (siehe Abb. 4a). Betrachtet man nun zwei unterschiedliche Räder, erhält man zwei Ebenen im Geschwindigkeitsraum und als mögliche Bewegung des Roboters die Schnittgerade der beiden Ebenen. Dieser Fall ist in Abbildung 4b) dargestellt. Auch hier gilt wieder, dass sich für $n \geq 3$ Räder im idealen Fall alle Schnittgeraden überlappen. Im Realfall ergeben sich natürlich für unterschiedliche Radpaare unterschiedliche Schnittgeraden. Im folgenden werden wir daher den Begriff der Geschwindigkeitskandidaten $\xi_{c,(k,l)}$ definieren, die sich jeweils anhand der Konfiguration zweier Räder k und l ergeben.



(a) Rad 1



(b) Rad 1 und Rad 2

Abbildung 4: a) Mögliche Bewegungen des Roboters, eingeschränkt durch die Gleitbedingung von Rad 1. Die blau eingezeichnete Gerade stellt dabei die Achse dar, um die die Ebene bei einer Veränderung des Lenkwinkels gedreht wird. b) Die zweite Ebene stellt die mögliche Bewegung des Roboters, eingeschränkt durch die Gleitbedingung von Rad 2 dar. Die blau eingezeichneten Geraden definieren die Rotationsachsen der Ebenen bei Veränderung des Lenkwinkels. Die Schnittgerade der beiden Ebenen ist schwarz dargestellt.

3.2 Vorwärtskinematik

Bei der Vorwärtskinematik geht es darum, anhand der gegebenen Konfiguration der einzelnen Räder ($\beta_i, \dot{\varphi}_i$), die Geschwindigkeit des Roboters zu bestimmen. Unter der Annahme idealer Verhältnisse kann die Geschwindigkeit des Roboters mithilfe der Roll- und Gleitbedingungen (Gl.5-6) eindeutig bestimmt werden. Die Gleitbedingungsmatrix ist eine $n \times 3$ Matrix, die bei geeigneter Koordination der Lenkwinkel einen Rang von zwei hat. Es ist daher ausreichend, zwei linear unabhängige Gleichungen der Matrix zu betrachten, um die Einschränkung der Bewegung des Roboters durch die Gleitbedingung zu erfassen. Definieren wir nun eine reduzierte Gleitbedingungsmatrix $\mathbf{C}(\beta_k, \beta_l)$, die sich nur aus den linear unabhängigen Gleitbedingungen für die Räder k und l zusammensetzt. In weiterer Folge lässt sich nun nach [4] eine Matrix $\Sigma(\beta_k, \beta_l)$ definieren, deren Spalten den Nullraum von $\mathbf{C}(\beta_k, \beta_l)$ aufspannen:

$$\text{span}\{\text{col}(\Sigma(\beta_k, \beta_l))\} = \text{null}(\mathbf{C}(\beta_k, \beta_l)) . \quad (7)$$

Da die reduzierte Gleitbedingungsmatrix einen Rang von zwei hat, ist $\Sigma(\beta_k, \beta_l)$ ein Vektor. Mit diesem Zusammenhang kann die Robotergeschwindigkeit bereits eingeschränkt werden:

$$\xi = \Sigma(\beta_k, \beta_l) \cdot \eta . \quad (8)$$

Um nun den Faktor η zu bestimmen, ist eine weitere Gleichung vonnöten, da bisher nur zwei linear unabhängige Gleichungen für die Bestimmung des dreielementigen Vektors ξ herangezogen wurden. Daher wird nun Gleichung 8 in die Rollbedingung von Rad k^1 eingesetzt und

¹Ohne Einschränkung der Allgemeinheit. Es kann natürlich auch die Rollbedingung von Rad l eingesetzt werden.

die resultierende Gleichung für die Vorwärtskinematik ergibt sich zu:

$$\xi = \Sigma(\beta_k, \beta_l) \frac{r_k \dot{\phi}_k}{\mathbf{j}_k^T(\beta_k) \Sigma(\beta_k, \beta_l)} =: \xi_{c,(l,k)} \quad (9)$$

Man erkennt, dass in dieser Gleichung Singularitäten vorkommen. Bei quasioimnidirektionalen Fahrwerken treten diese nur dann auf, wenn: A) Der Momentanpol in den Aufstandspunkt eines der beiden Räder fällt, oder B) die Achsen der beiden Räder sich decken. Singularitäten des Typs A) sind strukturelle Eigenheiten quasioimnidirektionaler Fahrwerke, Singularitäten vom Typ B) verletzen die Forderung $\text{rang}(\mathbf{C}(\beta_k, \beta_l)) = 2$ und entstehen daher aus der speziellen Wahl eines Radpaars k, l [7].

4 Diagnose

Jedes Rad im Roboter verfügt sowohl über einen Lenk- als auch einen Radantrieb. Geber stellen hierbei die nötige Sensorinformation für die entsprechenden Werte zur Verfügung ($\tilde{\beta}_i, \tilde{\phi}_i$). Im Folgenden werden nun die in dieser Arbeit berücksichtigten Fehler der einzelnen Komponenten näher beschrieben.

4.1 Mögliche Fehlerfälle

Zunächst unterscheiden wir drei unterschiedliche Arten von Fehlern, je nach Ort des Auftretens: a) Fehler in der Pfadplanung: Wir erlauben in Geometrie und Funktionalität veränderliche Fahrwerke. Ein Fahrbefehl des Pfadplaners kann daher für den momentan gültigen Betriebs- oder Fehlerzustand ungeeignet sein. b) Abweichungen im gewünschten Verhalten aufgrund mechanischer Defekte des Fahrwerks oder durch Einflüsse aus der Umgebung und c) Sensorfehler. In weiterer Folge unterscheiden wir verschiedene Defekte der einzelnen Komponenten. Da jedes Rad unseres Roboters mit Lenkantrieb und Radantrieb ausgestattet ist, ergeben sich pro Radeinheit zwei mögliche fehlerhafte Komponenten und die dazu passenden Sensorfehler. Außerdem kann eine Störung von außen das Verhalten des Fahrwerks beeinflussen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die betrachteten Fehlerfälle.

Komponente	Fehler	Simulation
Rad i	blockiert	$\dot{\phi}_i = 0$
	tw. blockiert	$\dot{\phi}_i$ wechselnd
	freilaufend	Motor OFF
Lenkung i	blockiert	Motor OFF
	Referenzierfehler (nicht messbar)	$\beta_i = \beta_i + \beta_{i,ref}$
	Offset (messbar)	$\beta_i = \beta_i + \beta_{i,off}$
Sensor i	Fehlfunktion	$y_i = \text{Wert}$
Störungen		

Tabelle 1: Mögliche Fehlerfälle der einzelnen Komponenten. Diese können als Einzel- oder Mehrfachfehler auftreten.

Diese Fehler können dabei einzeln oder auch in unterschiedlichen Kombinationen auftreten. Eine Störung von außen, wie etwa ein Zusammenstoß mit einem anderen Gegenstand, bewirkt i.A. eine Änderung des Verhaltens des gesamten Fahrwerks.

Analytische Redundanzbedingungen

Modellbasierte Diagnose erfordert in der Regel zwei Schritte [11]: Als erstes werden Unstimmigkeiten der aktuellen (gemessenen) Werte gegenüber den erwarteten Werten festgestellt. Solche Diskrepanzen werden mittels sogenannter Residuen mathematisch erfasst: Sie werden im fehlerfreien Fall zu Null und weisen andernfalls auf mögliche Fehler im System hin [6]. Im nächsten Schritt muss dann anhand dieser Information und den daraus resultierenden Fehlerkandidaten eine Entscheidung getroffen werden, welcher Fehler aufgetreten ist bzw. welche Komponente im System fehlerhaft ist. Die im ersten Schritt erfassten Unstimmigkeiten erfordern einen Vergleich, wofür Redundanz vonnöten ist. Wie diese Redundanz entsteht ist dabei vom System und den vorhandenen Sensoren abhängig. Es gibt im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: Einerseits kann diese Redundanz analytischer Natur sein und sich aufgrund der funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Prozessvariablen ergeben, d.h. anhand der algebraischen oder zeitlichen Zusammenhänge im Modell. Auf der anderen Seite kann Redundanz auch dadurch entstehen, dass beispielsweise redundante Sensoren verwendet werden. In unserem Fall ist jede Radeinheit mit zwei Sensoren, jeweils einem für die Raddrehzahl und den Lenkwinkel ausgestattet. Die analytische Redundanz wird hierbei durch die Berechnung der Geschwindigkeit erzeugt: Jeweils zwei Lenkwinkel und eine Raddrehzahl sind ausreichend, um eine Schätzung für die Geschwindigkeit $\tilde{\xi}_{c,(k,l)}$ basierend auf den Messungen der Werte zweier Räder l und k des Roboters zu erhalten (siehe Gl. 9). Im Fall eines Roboters mit $n = 3$ Rädern ergeben sich so 6 Möglichkeiten, die Geschwindigkeit zu berechnen.

Die Residuen werden generiert, indem einerseits die Geschwindigkeitskandidaten mit dem Sollwert und andererseits jeweils zwei Geschwindigkeitskandidaten miteinander verglichen werden. Ist die Bedingung für einen Geschwindigkeitskandidaten erfüllt, ist das zugehörige

Residuum der Bedingung Null. Andernfalls ergibt sich ein Wert verschieden von Null². Daher definieren wir die Residuen $r_{j,t}$ zum Zeitpunkt t als Boole'sche Fehlerindikatoren wie folgt

$$r_{j,t}(\xi_{Soll}, \xi_{Ist}) = \begin{cases} 0 & \xi_{Soll}, \xi_{Ist} \text{ stimmen \u00fcberein} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

4.2 Ablauf der Diagnose

Da wir einige verschiedene Arten von Fehlern mit unterschiedlichen Eigenschaften betrachten, wird ein mehrstufiger Ansatz verwendet, der diesen Unterschieden gerecht wird.

Schritt I: \u00dcberpr\u00fcfung des Fahrbefehls

Unter der Annahme, dass der Sollwert f\u00fcr die Geschwindigkeit vom Pfadplaner korrekt berechnet wurde und fahrwerksimmanente Singularit\u00e4ten vom Typ A) bereits ber\u00fccksichtigt wurden, werden in diesem Schritt lediglich Singularit\u00e4ten vom Typ B) ausgeschlossen. Durch diesen Schritt wird sichergestellt, dass f\u00fcr die Diagnose keine Geschwindigkeitskandidaten basierend auf zwei R\u00e4dern mit sich deckenden Radachsen herangezogen werden.³

Schritt II: Vergleich des Sollwertes mit den Geschwindigkeitskandidaten

Im n\u00e4chsten Schritt werden nun anhand der *gemessenen* Werte der einzelnen R\u00e4der ($\tilde{\beta}_i, \tilde{\varphi}_i$), die Geschwindigkeitskandidaten berechnet. Anschließend werden die Residuen $r_{j,t}(\xi_{Soll}, \xi_{c,(k,l)})$ f\u00fcr alle $j = 1, \dots, 2 \binom{n}{2}$ Geschwindigkeitskandidaten nach Gleichung (10) gebildet.

Fasst man die Ergebnisse der Auswertungen aller Gleichungen zusammen, ergibt sich f\u00fcr jede fehlerhafte Komponente im System ein spezielles Muster von erf\u00fcllten/nicht erf\u00fcllten Bedingungen. Dieses wird als Fehlersignatur [5, 1]

$$S_t = [r_{1,t} \quad r_{2,t} \quad \dots \quad r_{q,t}] , \quad q = 2 \cdot \binom{n}{2} , \quad (11)$$

bezeichnet und erlaubt eine Identifikation der fehlerhaften Komponente im System (Komponente bezeichnet dabei den mechanischen Teil und den zugeh\u00f6rigen Sensor.). Ist beispielsweise die Raddrehzahl von Rad 3 betroffen, erf\u00fcllen alle Geschwindigkeitskandidaten, deren Berechnung $\tilde{\varphi}_3$ beinhaltet, die Redundanzbedingung nicht; Die Auswertung aller Redundanzbedingungen f\u00fchrt daher zu folgender Fehlersignatur:

$$S = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1]$$

und die Raddrehzahl von Rad 3 wird als fehlerhaft erkannt. Diese Situation ist auch in Abbildung 5 im Geschwindigkeitsraum dargestellt. Nur die Geschwindigkeitskandidaten, deren Berechnung $\tilde{\varphi}_3$ beinhalten, zeigen deutliche Abweichungen vom gew\u00fcnschten Verhalten.

²Durch numerische Ungenauigkeiten, ungen\u00fcgendes Aufl\u00f6sungsverm\u00f6gen, Messfehler und Rauschen k\u00f6nnen diese Bedingungen im Allgemeinen nicht exakt erf\u00fcllt werden. Es ergibt sich daher ein Wert verschieden von Null. Man definiert entsprechende Schwellwerte, nach deren \u00dcberschreitung die Bedingung als nicht mehr erf\u00fcllt gilt.

³In diesem Schritt kann auch eine \u00dcberpr\u00fcfung des Geschwindigkeitssollwertes bez\u00fcglich der Singularit\u00e4ten vom Typ A) und damit eine Validierung der vom Pfadplaner bestimmten Geschwindigkeitsvorgabe durchgef\u00fchrt werden

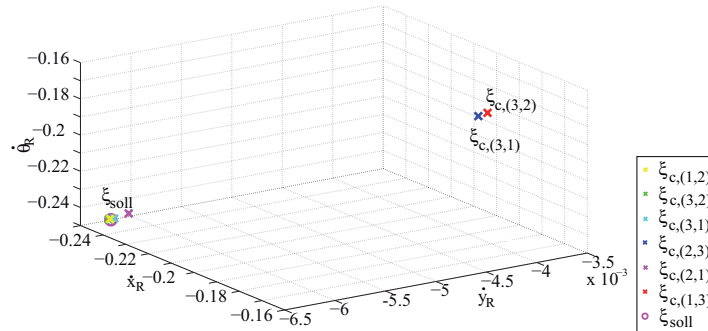


Abbildung 5: Vergleich der Geschwindigkeitskandidaten mit dem Sollwert im Geschwindigkeitsraum. Man erkennt, dass Kandidaten, deren Berechnung die Raddrehzahl von Rad 3 beinhalten, eine deutliche Abweichungen gegenüber dem Sollwert und den anderen Kandidaten aufweisen.

Die Auswirkungen eines Fehlers im Fahrwerk auf andere Komponenten sind abhängig von der Art des Fehlers. Das Blockieren eines Rades bewirkt beispielsweise auch eine deutliche Änderung der Drehzahlen der anderen Räder und damit eine Abweichung vom Sollwert. Dies wirkt sich natürlich auch auf die Auswertung der Residuen aus und die fehlerhafte Komponente kann auf diese Weise nicht mehr eindeutig bestimmt werden. Aus diesem Grund werden im nächsten Schritt die einzelnen Geschwindigkeitskandidaten miteinander verglichen.

Schritt III: Vergleich der einzelnen Geschwindigkeitskandidaten

In diesem Schritt werden Redundanzbedingungen für die einzelnen Geschwindigkeitskandidaten untereinander definiert, um die eigentlich fehlerhafte Komponente bestimmen zu können:

$$r_{j,t}(\tilde{\xi}_{c,(k,l)}, \tilde{\xi}_{c,(m,n)}) = \begin{cases} 0 & \tilde{\xi}_{c,(k,l)}, \tilde{\xi}_{c,(m,n)} \text{ stimmen überein} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (12)$$

k, l, m, n sind dabei so zu wählen, dass alle möglichen Kombinationen von Komponenten abgedeckt werden. Hierbei wird von der Annahme ausgegangen, dass Komponenten, deren Geschwindigkeitskandidaten trotz eventuell vorhandener Abweichung vom Sollwert die Redundanzbedingung erfüllen, von der fehlerhaften Komponente betroffen sind, jedoch nicht die Ursache des Problems darstellen.

Schritt IV: Vergleich von $\dot{\Theta}_R$ mit einem Gyroskop

Als zusätzliches Messinstrument befindet sich ein Inertialnavigationssystem auf dem Roboter. Mithilfe des Gyroskops kann direkt ein Vergleichswert für die dritte Komponente des Geschwindigkeitsvektors $\dot{\Theta}_R$ gewonnen werden. Auf diese Weise ist es möglich Sensorfehler von Aktuatorfehlern zu unterscheiden. Eine deutliche Abweichung einer aus Messungen berechneten Geschwindigkeit in Kombination mit einem annehmbaren Messwert des Gyroskops liefert daher einen Hinweis auf einen Sensorfehler, wenn ein mechanischer Defekt, eine stärkere Beeinflussung des Fahrverhaltens bedeuten würde.

Auswertung der Residuen

Der Vergleich zweier berechneter Geschwindigkeitskandidaten $\tilde{\xi}_{c,(k,l)}$ miteinander oder mit dem Sollwert ist bei einem realen Roboter nicht ganz unproblematisch. In der vorliegenden Arbeit wurden für den Vergleich experimentell bestimmte Schwellwerte festgelegt, bei deren Überschreitung die Residuen nach Gleichung 10 bzw. Gleichung 12 zu 1 werden. In weiterer Folge arbeiten wir an der Verwendung einer geometrisch fundierten Metrik, die berücksichtigt, dass es sich bei den Geschwindigkeiten im Geschwindigkeitsraum um translatorische und rotatorische Geschwindigkeiten handelt.

5 Testfahrten mit dem Roboter

Für die angeführten Testfahrten wird eine Anordnung unseres aus wabenförmigen Elementen aufgebauten Roboters [9, 8] mit 4 Modulen und 3 gelenkten Standardrädern verwendet (siehe auch Abb. 1). Der Roboter hat daher in diesem Fall sechs Komponenten, die fehlerhaft sein können, drei Radantriebe sowie drei Lenkantriebe mit den zugehörigen Sensoren.

Im folgenden Experiment erhielt der Roboter die Vorgabe, aus dem Stand bis zu einer Maximalgeschwindigkeit von $1.5m/s$ zu beschleunigen und sich dabei auf einem Kreisbogen von einem Meter Radius zu bewegen. Rad 3 ist dabei von Beginn an freilaufend. Dies resultiert in einer um den Sollwert schwankenden Drehzahl, wie in Abbildung 6c) erkennbar ist. Nach Auswertung der Residuen von Schritt II ergibt sich daher eine Fehlersignatur von

$$S = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$$

und die Drehzahl von Rad 3 wird als fehlerhaft erkannt.

Zum Zeitpunkt $t = 36$ wird in weiterer Folge Rad 3 blockiert. Der Roboter wird dadurch auf der Seite dieses Rades stark abgebremst; Die Drehzahlen der anderen Rädern weisen deutliche Abweichungen auf (siehe Abbildung 6a) und b)). Die Fehlersignatur der Vergleiche mit den Sollgeschwindigkeiten, erlaubt daher keine eindeutige Bestimmung der fehlerhafte Komponente. Betrachtet man nun aber in Schritt III die einzelnen Geschwindigkeitskandidaten, erkennt man, dass jene Geschwindigkeitskandidaten, die nur mit den Drehzahlen der Räder 1 und 2 berechnet wurden, die Redundanzbedingung nach Gl. (12) erfüllen. Abbildung 6d) verdeutlicht dies. Die Auswertung von Schritt III liefert daher die fehlerhafte Komponente ϕ_3 .

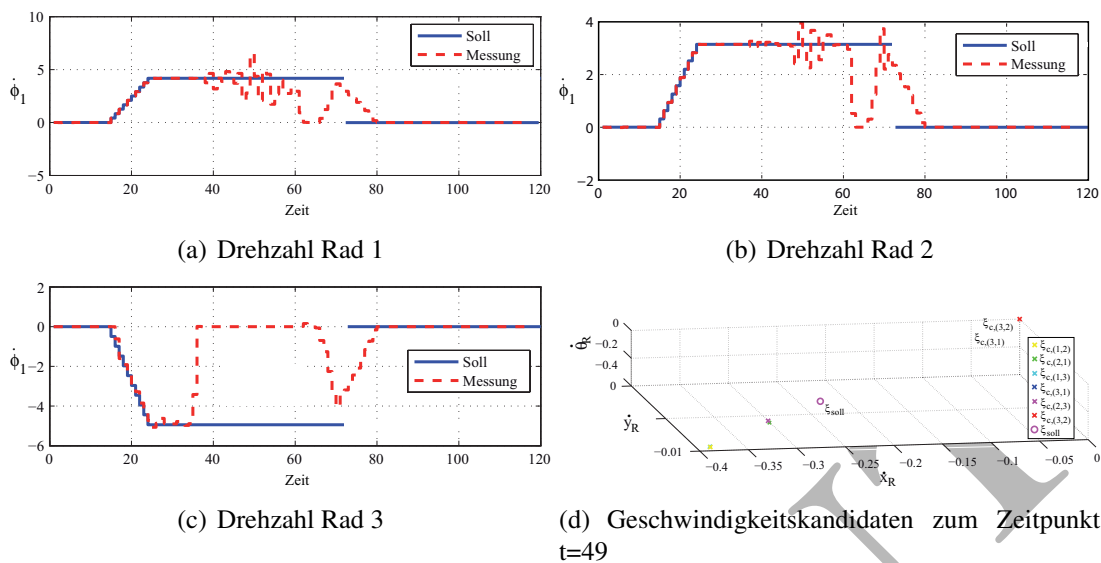


Abbildung 6: a) bis c) Verlauf der Drehzahlen der einzelnen Räder. Rad 3 ist bis $t = 36$ freilau-
fend. Dies resultiert in einer um den Sollwert schwankenden Geschwindigkeit. Danach wird
Rad 3 blockiert; Alle Drehzahlen reagieren deutlich auf diesen Fehler. d) Geschwindigkeits-
kandidaten zum Zeitpunkt $t = 49$.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode zur Fehlererkennung für quasiomnidirektionale Radroboter vor. Basierend auf einer sorgsamten Analyse der kinematischen Beschränkungen eines solchen Roboterfahrwerks werden die Auswirkungen eines Fehlers auf das Fahrverhalten des gesamten Roboters betrachtet. Dies ist für quasiomnidirektionale Roboter von großer Bedeutung, da sich, bedingt durch die Überbestimmtheit eines solchen Fahrwerks, eine starke Kopplung des Verhaltens der Komponenten untereinander ergibt, welche für die Bestimmung der fehlerhaften Komponente im System wesentlich ist.

Diese Methodik stellt ein spezialisiertes Diagnoseverfahren dar; Jedoch kann durch die Berücksichtigung der besonderen Struktur des Problems durch explizite Anwendung der Fahrwerkskinematik ein entscheidender Vorteil bei der Erkennung der ursächlich fehlerhaften Komponente im Vergleich zu einer bloßen Betrachtung der Soll- und Istwerte der einzelnen Parameter gewonnen werden.

Literatur

- [1] M. Bayouth, L. Travé-Massuyès, and X. Olive. Hybrid systems diagnosis by coupling continuous and discrete event techniques. In *Proceedings of the IFAC World Congress, Seoul, Korea*, pages 7265–7270, 2008.
- [2] J. Borenstein and L. Feng. Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. *IEEE Transactions Robotics & Automation*, 12(6):869–880, 1996.

- [3] Mathias Brandstötter, Michael Hofbaur, Gerald Steinbauer, and Franz Wotawa. Model-based fault diagnosis and reconfiguration of robot drives. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1203–1209, October 2007.
- [4] Guy Campion, Georges Bastin, and Brigitte D’Andrèa-Novel. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1):47–62, 1996.
- [5] V. Cocquempot, T. El Mezyani, and M. Staroswiecki. Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals. In *IEEE/IFAC-ASCC : Asian Control Conference*, 2004.
- [6] J. Gertler. A survey of analytical redundancy methods in failure detection and isolation. In *Preprints of the IFAC SAFEPROCESS Symposium*, pages 9–21, 1991.
- [7] P. Robuffo Giordano, M. Fuchs, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger. On the kinematic modeling and control of a mobile platform equipped with steering wheels and movable legs. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2009)*, 2009.
- [8] M. Hofbaur, M. Brandstötter, Ch. Schörghuber, and G. Steinbauer. On-line kinematics reasoning for reconfigurable robot drives. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 10)*, 2010.
- [9] Michael Hofbaur, Mathias Brandstötter, Simon Jantscher, and Christoph Schörghuber. Modular Re-configurable Robot Drives. *International Conference on Robotics and Automation and Mechatronics (RAM 2010)*, 2010.
- [10] P. Sundvall and P. Jensfelt. Fault detection for mobile robots using redundant positioning systems. *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 3781–3786, 2006.
- [11] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, and Surya N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis part i: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27:293–311, 2003.
- [12] Vandi Verma, Geoff Gordon, Reid Simmons, and Sebastian Thrun. Tractable particle filters for robot fault diagnosis: Real-time fault diagnosis. *Robotics & Automation Magazine*, 11(2):56 – 66, June 2004.