

Fortschritte in der Fertigungswissenschaft und -technologie

Modellierung der Kinematik zweier Roboter mit Denavit-Hartenberg-Notation

Andrzej Burghardt, Wincenty Skwarek

aAbteilung für Angewandte Mechanik und Robotik, Technische Universität Rzeszów
bJohannes Paul II. Technischer und allgemeinbildender Schulkomplex Nr. 4, Jasło, Polen

Zusammenfassung Dieser Artikel enthält eine Beschreibung und Methodik zum Aufbau eines Kinematikmodells für die Bildung zweirädriger mobiler Roboter, die einen Balken transportieren, unter Verwendung der Denavit-Hartenberg-Notation. Die einfachen und inversen Kinematikaufgaben dieser Formation wurden gelöst. Lösungen kinematischer Aufgaben werden in Knotenkoordinaten und globalen Koordinaten dargestellt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden mit dem Matlab-Simulink-Paket zusammen mit einer Animation der Lösung mithilfe eines programmierten Emulators der Roboterarbeit simuliert.

Schlüsselwörter Roboterbildung, Kinematik, Denavit-Hartenberg-Notation, Transformationsmatrix

1. Einleitung

Derzeit werden autonome Fahrzeuge zunehmend zum Transport von Gegenständen in Fabrikhallen, Lagerhallen oder Lagerplätzen eingesetzt. Viele der zu transportierenden Großgüter stellen ein Problem dar, da ein einzelner Roboter sie nicht transportieren kann und der Bau spezieller Transportmaschinen möglicherweise nicht wirtschaftlich ist. Die Idee, Gegenstände durch Formationen aus mehreren Robotern zu transportieren, die nach Erledigung einer bestimmten Aufgabe in einer anderen Konfiguration für die nächsten Aufgaben eingesetzt werden können, stammt aus der Welt der Natur. Dieser Ansatz ist wirtschaftlich gerechtfertigt, da ein bestimmter Robotertyp für verschiedene Zwecke eingesetzt werden kann.

Das Thema des Transports von Objekten durch Roboterformationen wurde in wissenschaftlichen Arbeiten wiederholt behandelt, beispielsweise in Arbeiten zum Problem des Schiebens einer Kiste [1], des Schiebens eines erheblichen Gewichts, das über eine eigene Stütze in Form von Rädern verfügt [2], Transport eines Objekts, das sich über den Robotern befindet [3], Bewegen eines Objekts durch benachbarte Roboter [4] oder Balkentransport durch zwei Roboter [5]. Beim Aufbau eines Steuerungssystems ist es notwendig, das mathematische Modell der Kinematik des untersuchten Transportsystems zu kennen, das zur Erstellung eines mathematischen Modells verwendet wird, das die Dynamik dieses Systems beschreibt, oder zum Aufbau eines Steuerungssystems, das allein auf der Kinematik basiert.

Die Kinematik kann mit den sogenannten klassischen Methoden beschrieben werden, die auf der Erstellung eines Geschwindigkeitsplans für bestimmte Zwecke basieren.

charakteristische Formationspunkte [6] oder unter Verwendung der sogenannten Denavit-Hartenberg (DH) [7]-Notation, die sehr häufig zur Beschreibung der Kinematik mehrgliedriger Systeme verwendet wird und in der Robotik weit verbreitet ist.

In diesem Artikel wird das Problem des Strahltransports durch zwei AmigoBot-Rollroboter (WMR) basierend auf der DH-Notation vorgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Roboter den Strahl entlang der horizontalen XY- Ebene transportieren, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Die Aufgabe der Roboter besteht darin, einen Balken mit einer Länge von l zu transportieren. Die Roboter sind an den Punkten $H1$ und $H2$ über Schraubverbindungen mit dem Träger verbunden und bilden kinematische Paare fünften Grades. In der Formation werden charakteristische Punkte unterschieden: M , charakteristischer Punkt der Formation ist der Mittelpunkt des transportierten Strahls; E , temporäres Rotationszentrum der Formation; $A1$ und $A2$, Punkte auf der Achse der Räder einzelner Roboter in der Mitte zwischen den Rädern; $B1$, $C1$ und $C2$, Punkte, die die Mittelpunkte einzelner Roboter bleiben. $B2$, mit Räder; und $K1$, $P1$, $K2$ und $P2$, Kontaktpunkte einzelner Roboterräder dem Boden. Es werden auch charakteristische Werte unterschieden: xM , yM , Koordinaten des charakteristischen Punktes der Formation im Basissystem (stationär); $\dot{\gamma}$, Rotationswinkel des transportierten Strahls in Bezug auf das Grundsystem; l

Abstand zwischen Punkten A oder B und C ; , Entfernung der Strahlbefestigungspunkt mit dem Roboter von Punkt A ; r , Radius des Roboterantriebsrads; $\dot{\gamma}1f$, $\dot{\gamma}2f$, Drehwinkel einzelner Roboter relativ zum transportierten Strahl (Formationssystem); $\dot{\gamma}11$, $\dot{\gamma}21$, $\dot{\gamma}12$, $\dot{\gamma}22$, Drehwinkel der Räder, die die Roboter antreiben.

*Korrespondierender Autor: Andrzej Burghardt, Wincenty Skwarek

*E-Mail: andrzejb@prz.edu.pl, wincentyskwarek@op.pl

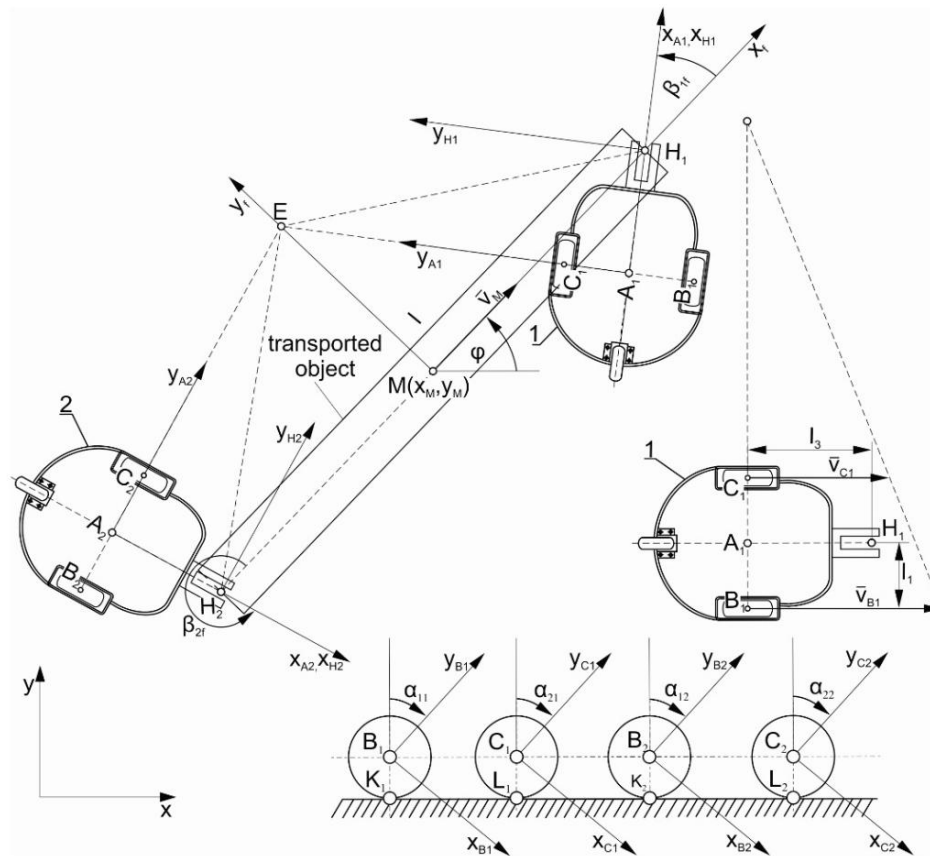


Abbildung 1. Bildung zweirädriger mobiler Roboter, die einen Balken transportieren.

Für diese Winkel wurden folgende Symbole übernommen: Die erste Ziffer gibt die Nummer des Rades und die zweite Ziffer die Nummer des Roboters an.

Die verwendeten AmigoBot WMRs verfügen neben zwei Antriebsrädern über ein selbsteinstellendes Stützrad, auf das jedoch bei der Erstellung des Modells verzichtet wurde, da davon ausgegangen wird, dass es einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Kinematik des Gesamtsystems

Die Lösung der inversen Kinematikaufgabe wird zum Aufbau des Steuerungssystems verwendet und ist daher in der Regel wichtiger als die Lösung der einfachen Kinematikaufgabe, mit der, wie im Fall der Autoren, ein Emulator der Roboterbildung aufgebaut werden kann arbeiten.

2. Formulierung kinematischer Aufgaben

Durch die Analyse der Formationskinematik werden zwei Aufgaben gelöst. Die erste Aufgabe ist eine einfache Kinematikaufgabe, deren Zweck in diesem Fall darin besteht, die kinematischen Parameter des transportierten Strahls in Form von Geschwindigkeit und Ort des M -Punkts sowie der Winkelgeschwindigkeit und dem Drehwinkel des zu bestimmen vorausgesetzt, dass die kinematischen Parameter der Antriebe bekannt sind. Die zweite Aufgabe ist die inverse Kinematik-Aufgabe, die darin besteht, die kinematischen Parameter der Antriebe zu bestimmen, vorausgesetzt, dass die lineare Geschwindigkeit des charakteristischen Punkts der Formation bekannt ist, in diesem Fall die Geschwindigkeit des M -Punkts und die Winkelgeschwindigkeit des transportierten Strahls.

3. Leistung von Bewegungsgleichungen basierend auf der DH-Notation

Wenn mit der Generierung von Bewegungsgleichungen begonnen wird, besteht der erste Schritt darin, jedem charakteristischen Punkt der WMR-Formation, die den Strahl transportiert, und einem stationären Referenzsystem, dem sogenannten Basissystem, lokale Referenzsysteme zuzuordnen. Nach der Definition der Systeme wurden Transformationsmatrizen zwischen diesen Systemen eingeführt.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(9)

(2)

(3)

(13)

(4)

(14)

(5)

$$\hat{y}(6)$$

(6)

(7)

(17)

9

y
ÿ

123

1	11
2	22

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

4. Lösungshinweis: Axiomatische Aufgaben

4 911 921 4 912 922

124

$\bar{y} \bar{y} \bar{y} \bar{y}$	$2 \bar{y} 1 \bar{y} 2 \bar{y} 1 \bar{y} 2 \bar{y}$	$2 \bar{y} 3 \bar{y} 2$	$\bar{y} \bar{y} \bar{y} \bar{y}$	$2 \bar{y} \bar{y} 12$	$\bar{y}$
$\bar{y} \bar{y} \bar{y} \bar{y}$	$1 \bar{y} \bar{y} 2 \bar{y} 1 \bar{y}$	$\bar{y} 3 \bar{y} 2 \bar{y}$	$\bar{y} \bar{y} \bar{y}$	$2 \bar{y} \bar{y} 12$	$\bar{y}$
		$3 \bar{y} 2 \bar{y} 3 \bar{y}$		$2 \bar{y} \bar{y} 12$	$\bar{y}$
				$2 \bar{y} \bar{y} 12$	$\bar{y}$

einfachen Kinematik	2	1	1	2	3	4.1. Lösung der	2	1
2	1	1	2	3	2	1	2	3

$\ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y} \ddot{y}$
 Durch Lösen der Gleichungssysteme (21)–(24) wurden die folgenden
 Gleichungen erhalten:

$$= \frac{\bar{y} + 1}{\frac{\bar{y} + 1}{4}} (\bar{y}_{11} + \bar{y}_{21}) + \frac{\bar{y} + 2}{\frac{2\bar{y}}{4}} (\bar{y}_{12} + \bar{y}_{22}) \bar{y} + \quad (25)$$

$$\begin{array}{r} \bar{y} + 1 \\ 3 \overline{) 81} \\ \underline{3} \\ 41 \end{array} \quad \begin{array}{r} (\bar{y}11 \bar{y} \bar{y}21) \bar{y} \\ (\bar{y}11 \bar{y} \bar{y}21) \bar{y} \end{array} \qquad \begin{array}{r} \bar{y} + 2 \\ 3 \overline{) 82} \\ \underline{3} \\ 41 \\ 1 \end{array} \quad \begin{array}{r} (\bar{y}12 \bar{y} \bar{y}22) \\ (\bar{y}12 \bar{y} \bar{y}22) \end{array}$$

$$= \frac{\ddot{y} + 1}{\ddot{y} + 1} \frac{(\ddot{y}_{11} + \ddot{y}_{21})}{(\ddot{y}_{11} + \ddot{y}_{21})} + \frac{\ddot{y} + 2}{\ddot{y} + 2} \frac{(\ddot{y}_{12} + \ddot{y}_{22})}{(\ddot{y}_{12} + \ddot{y}_{22})} \quad (2)$$

[illegible]

$$\begin{aligned} & \ddot{y}_1 + 2 \ddot{y}_2 + \ddot{y}_{12} + \ddot{y}_{22} + \ddot{y}_{11} + \ddot{y}_{21} = 0 \\ & \ddot{y}_1 + 2 \ddot{y}_2 + \ddot{y}_{12} + \ddot{y}_{22} + \ddot{y}_{11} + \ddot{y}_{21} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$1 = \frac{y}{2} + \frac{y+1}{2} y y^3 + \frac{y+1}{2} y^{11} \quad (28)$$

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Drehwinkel von Robotergelenken φ_i und Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}_i$ werden in Kreuzungskordinaten gemessen um das globale $\ddot{y}$ zu 1 Koordinaten wurden folgende Abhängigkeiten verwendet: 1 $\ddot{y} + 2 \ddot{y} \ddot{y}_3$

$$\begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

[illegible]

$$\frac{1}{1} = y; \frac{1}{1} = 4_1 \frac{1}{1} y_{11} \quad y \quad 4 \quad 4_1 \quad y \quad y_{21} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \end{aligned} \quad (33)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (30)–(33) in (25)–(29) ergibt sich die folgende Gleichungen wurden erhalten:

[illegible]

$$+ y \frac{22}{41} \frac{33}{19} \frac{23}{41} \frac{23}{41} \frac{1}{y} \frac{2}{41} \frac{2}{41} \frac{3}{41} \frac{3}{41} \frac{2}{41} \frac{2}{41} \frac{3}{41} \frac{1}{y} \frac{22}{41}$$

[illegible]

Modellierung der Kinematik zweier Roboter mit Denavit-Hartenberg-Notation

[illegible]

$$y_1 = \frac{y_2}{2} = \frac{y + 2 \cdot y \cdot y \cdot y \cdot y \cdot y + y + 2 \cdot y \cdot y + y + 1 \cdot y + y + 1 \cdot y + 1 \cdot y + 1 \cdot y}{2} \quad (44)$$

(36)

Durch Ersetzen der Abhängigkeiten (30)–(33) durch (39)–(44) wird die

[illegible]

[illegible]

$$\begin{array}{l} y_{12} = \frac{2}{x} \frac{3}{3} \frac{2y}{123} \frac{2}{2} \frac{y}{y} \frac{2}{2} \frac{1}{1} \frac{2+32+}{32+3} \frac{2}{2} \frac{y}{y} \frac{y}{y} \frac{1}{1} \frac{(y2)y3}{2} \frac{3}{3} \frac{(y2)y}{2} \\ y_{12} = \frac{2}{2} \frac{3}{3} \frac{2y}{2y} \frac{123}{2y} \frac{2}{2} \frac{y}{y} \frac{2}{2} \frac{1}{1} \frac{2+32+}{2+3} \frac{2}{2} \frac{y}{y} \frac{y}{y} \frac{1}{1} \frac{(y2)y3}{2} \frac{3}{3} \frac{(y2)y}{2} \end{array} \quad (47)$$
[illegible]
$$\begin{array}{ccccccc}
 y_{22} = & 1 & 3 & 2\frac{1}{2} & 1\frac{1}{2} & 2 & 1 \\
 y_{22} & & & 2 & & & 2 \\
 & & & 2 & & & 2 \\
 & & & 3 & & & 2_3 \\
 & & & & & & 2_3 \\
 y_2 & & 1+2 & & 1+ & & 1y \\
 1 & & y_2 & & 1+ & & (1y) \\
 1 & & y_2 & & 2 & 3 & 1+ \\
 1 & & 1+2 & & 1+ & & (1y) \\
 1 & & 1+2 & & 2+ & & 1y \\
 & & & & 2+ & &
 \end{array}
 \quad (49)$$
$$\begin{array}{ccccccc}
 1 & & & & 2_3 & & \\
 & y_2 & & 2+2 & 2y & & 2y \\
 2 & y_2 & & 2+2 & 2_3 & 2y & 2y \\
 & y_2 & & 2+2 & 2_3 & 2y & (2y) \\
 2 & y_2 & & 2+2 & 2_3 & 2y & (2y) \\
 2 & = & & & 2_3 & & \\
 & & & & 2_3 & &
 \end{array} \quad (50)$$

Die Gleichungen (45)–(48) sind eine Lösung für das Problem der inversen Kinematik, dargestellt in globalen

Koordinaten, ergänzt durch y_{22}

5. Simulationen

Simulationen der erhaltenen Lösungen wurden in der Matlab/Simulink-Umgebung durchgeführt. Ein Roboteremulator wurde entwickelt, um das

Verhalten der Roboter zu visualisieren und in einer bestimmten Frequenz eine Ansicht der Roboter zusammen mit dem transportierten Objekt zu

Die Transportaufgabe besteht darin, einen Strahl mit einer Länge von $l = 1$

[m] in Abbildung 2 zu transportieren, wobei sich ein charakteristischer Punkt entlang der in Abbildung 3 gezeigten Spur bewegt und die lineare

Es wurden Anfangsbedingungen angenommen: Punkt M des Strahls liegt bei $t = 0$ am Anfang des globalen Bezugssystems und der Winkel zwischen dem

Um die Bewegung des Strahls gemäß den angenommenen Kriterien

sicherzustellen, wurden die in Abbildung 4 dargestellte lineare Geschwindigkeit des Punktes M und die Winkelgeschwindigkeit des

transportierten Strahls in Abbildung 5 erzeugt. Beide Geschwindigkeiten mü

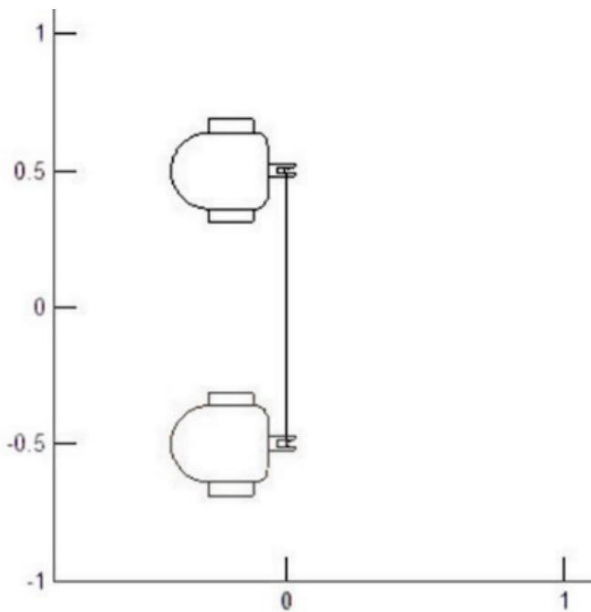


Abbildung 2. Definition der Transportaufgabe.

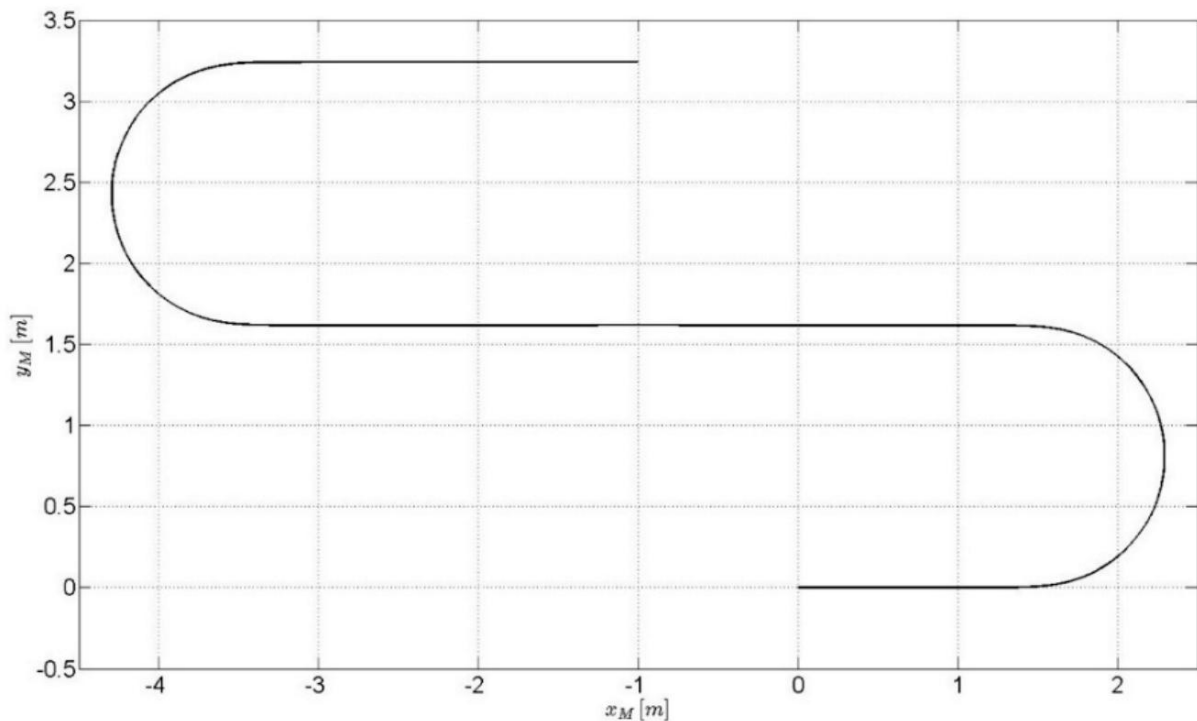
Mit den so gewählten Parametern lassen sich folgende Bewegungsphasen unterscheiden, von denen sich mehrere wiederholen: Beschleunigung, Geradeausfahrt mit eingestellter Geschwindigkeit, Kurveneinfahrt, Kurvenfahrt und Bremsen.

Die Aufgabe des in Simulink erstellten Modells bestand darin, die Aufgabe der inversen Kinematik zu lösen, die zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Räder führte, die die Roboter antreiben. Nach Durchführung der Simulation wurden die Ergebnisse für den in Abbildung 6 gezeigten ersten Roboter und den in Abbildung 7 gezeigten zweiten Roboter. Das mit dem Emulator der Roboterarbeit erhaltene Bild ist in Abbildung 8 dargestellt.

Nach der Analyse der mit dem Arbeitsemulator erhaltenen Animation der Roboterbewegung und des empfangenen Bildes der Animationsaufzeichnung wurde nicht festgestellt, dass sich die Roboter falsch bewegen könnten. Während der Bewegung wurde kein Drift der Roboter oder eine falsche Ausrichtung der Roboterrahmen beobachtet, was die Richtigkeit der erhaltenen Lösungen beweist.

6. Fazit

Die in diesem Artikel vorgestellte Methode der Kinematik einer WMR-Formation unter Verwendung der DH-Notation ist universell und bequem zu implementieren. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Software für symbolische und Matrix-Vektor-Berechnungen zu verwenden, was den Prozess der Erstellung kinematischer Gleichungen im Vergleich zu anderen Methoden erheblich beschleunigt. In dieser Arbeit wurde eine Formation bestehend aus zwei Robotern modelliert, es ist jedoch sehr einfach, das Problem auf N-Roboter zu erweitern, die ein sperriges Objekt transportieren. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen anderer Methoden überein [9]. Weitere Schlussfolgerungen

Abbildung 3. Flugbahn des M -Punktes

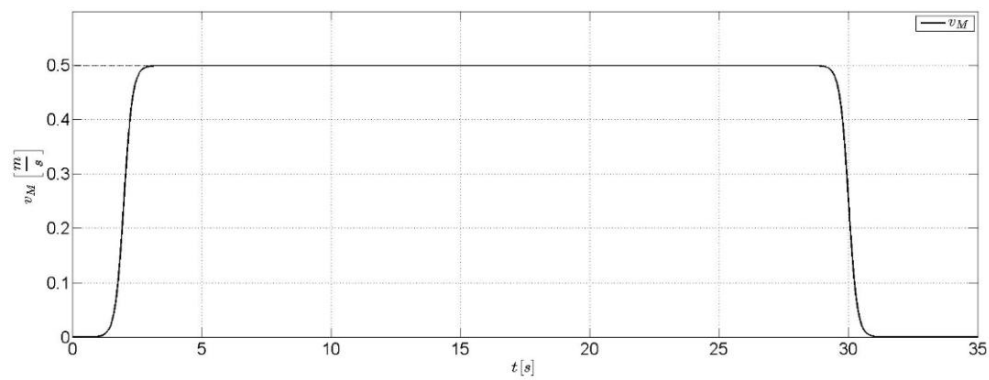


Abbildung 4. Geschwindigkeit des M - Punktes.

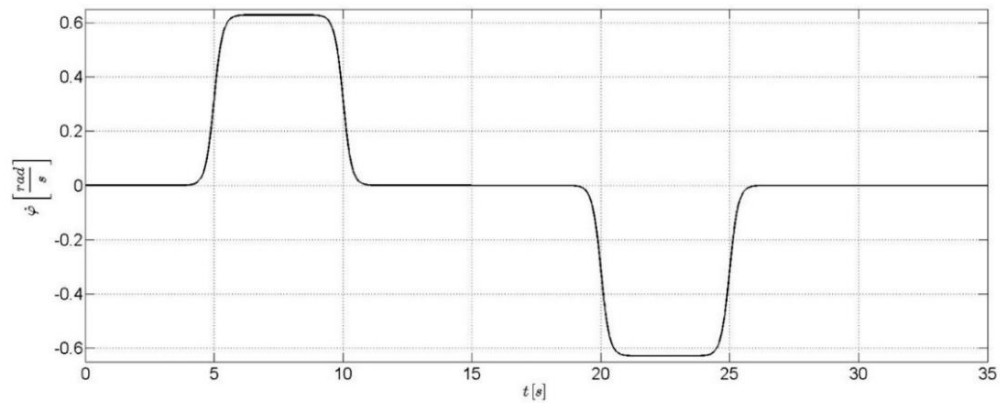


Abbildung 5. Winkelgeschwindigkeit des transportierten Strahls.

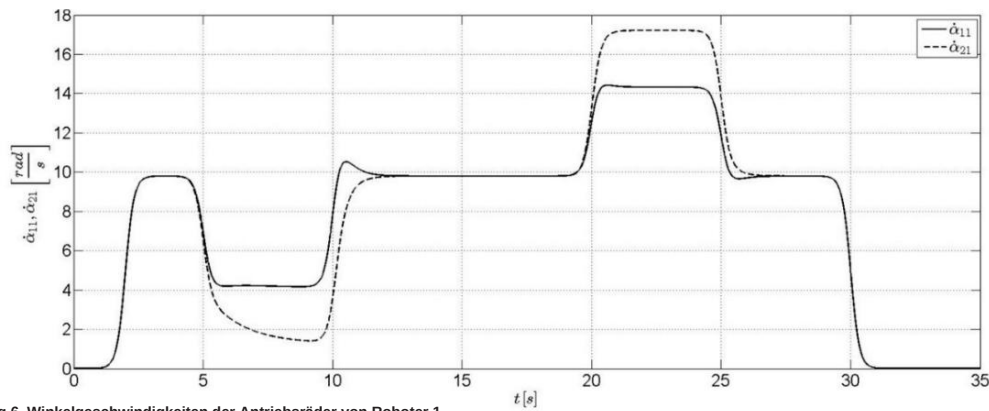


Abbildung 6. Winkelgeschwindigkeiten der Antriebsräder von Roboter 1.

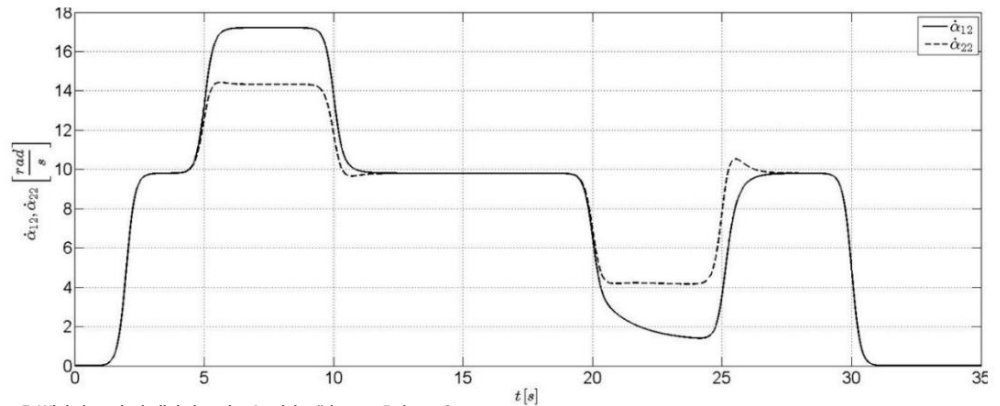


Abbildung 7. Winkelgeschwindigkeiten der Antriebsräder von Roboter 2.

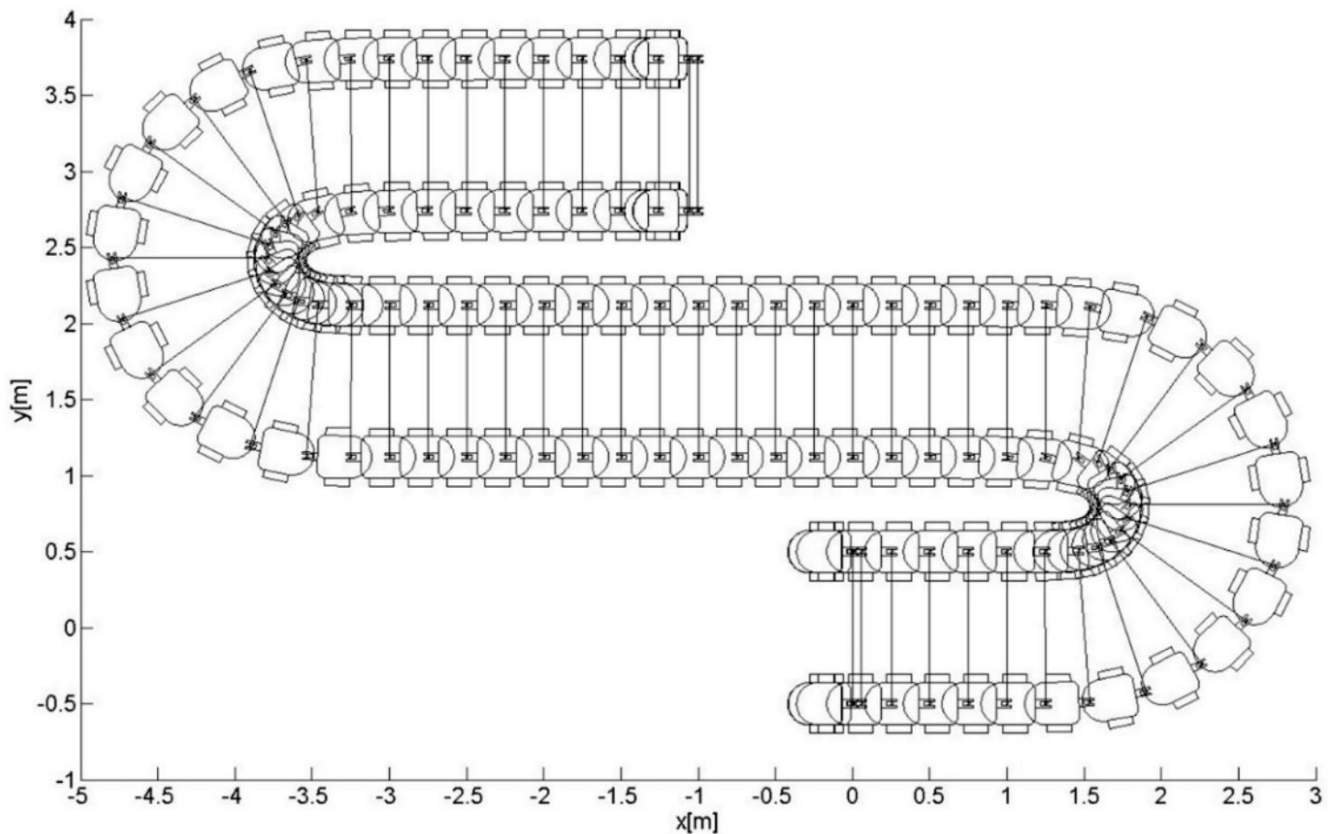


Abbildung 7. Winkelgeschwindigkeiten der Antriebsräder von Roboter 2.

zielte auf den Bedarf an weiterer Forschung zur Interaktion von Robotern mit dem transportierten Objekt und der Umgebung ab. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das erhaltene Kinematikmodell und die Methodik zu seiner Erlangung zur Erforschung komplexerer Formationen sowie zur Erstellung eines Dynamikmodells verwendet werden können.

Verweise

- [1] C. ZIELINSKI, P. TROJANEK: Stigmergische Kooperation autonomer Roboter. *J Mech. Mach. Theory*, 44(2009), 656-670.
- [2] N. MIYATA, et al.: Kooperativer Transport durch mehrere mobile Robots in unbekannten statischen Umgebungen im Zusammenhang mit Echtzeit Aufgabenzuweisung. *IEEE Trans Rob Autom.*, 18(2002), 769-780.
- [3] K. KOSUGE, et al.: Transport eines einzelnen Objekts durch zwei Dezentralgesteuerte nichtholonome mobile Roboter. *Proz. IEEE Internat. Konf. Robotik und Automatisierung*, Leuven 1998, 4, 2989-2994.
- [4] Z.-D. WANG, E. NAKANO, T. MATSUKAWA: Kooperierende Multiverhaltensbasierte Roboter zur Objektmanipulation. *Proz. 1994 IEEE/RSJ Inter Conf Intelligent Robots and Systems*, München 1994, 1524-1531.
- [5] D. CHEN, et al.: Fahrzeug-Arm-Koordination und dezentrale Zusammenarbeit mehrerer mobiler Manipulatoren. *Proz. 1996 IEEE/RSJ Inter. Konf. Intelligente Roboter und Systeme*, Osaka 1996, 546-553.
- [6] A. BURGHARDT, J. GIERGIEL: Kinematik einer Roboterformation im Großtransport. *Polnisch J. Environ. Stud.*, 20(2011), 41-45.
- [7] J. GIERGIEL, T. BURATOWSKI: Kinematikmodellierung des AmigoBot-Roboter. *Mech. Mech. Eng.*, 14(2010), 57-64.
- [8] A. BURGHARDT: Modelowanie i sterowanie formacji robotów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [9] A. BURGHARDT, W. SKWAREK: Robotergruppenkinematik. *Modell. Eng.*, 69(2019), 12-16.