Modulares Bewegungs- und Darstellungsmodell für serielle Kinematiken

Dipl.-Ing. Martin Erler

1 Einleitung

Im Rahmen der Verifikation von NC-Daten spielt die Kollisionsvermeidung eine zentrale Rolle. Insbesondere bei der Fünfachssimultanbearbeitung gestaltet sich die Bewegung der Maschinenkomponenten als nicht trivial. Um eine Kollisionsprüfung zwischen Maschinenkomponenten und Werkstück durchführen zu können, ist die Kenntnis der zeitabhängigen Position dieser erforderlich. Gewährleistet wird dies üblicherweise durch die analytische Beschreibung der kinematischen Ketten und anschließender Verknüpfung dieser mit den CAD-Daten einer zu betrachtenden Werkzeugmaschine.

Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass für jede Werkzeugmaschine die Beschreibung und anschließende Kopplung mit den spezifischen CAD-Daten gesondert vorgenommen werden muss. Eine solche Herangehensweise ist zum einen arbeitsintensiv und zum anderen nicht automatisierbar. Die fehlende Automatisierbarkeit gestaltet sich jedoch gerade in Bereichen mit umfangreichen Bewegungs- und Darstellungsmodellen von Werkzeugmaschinen als impraktikabel.

Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung eines Softwaremoduls, das durch eine modulare und verallgemeinerte Beschreibung kinematischer Ketten, die automatische Nachbildung ermöglicht. Voraussetzung dafür ist die korrekte analytische Beschreibung der kinematischen Kette und die Kopplung der Komponenten mit den CAD-Daten einer Werkzeugmaschine mit serieller Kinematik. Ausgegangen wird dabei allein von den Informationen zur Konfiguration und den CAD-Daten der Werkzeugmaschine.

2 Kinematik einer Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschinen mit serieller Kinematik kommen in unterschiedlichsten Bereichen zur Anwendung und haben dementsprechend eine Vielzahl von mehr oder weniger üblichen Bauformen /Per09/. Unabhängig davon besitzen sie jedoch alle eine - meistens jedoch mehrere - kinematischen Ketten. Eine kinematische Kette ist dabei als Mehrkörpersystem zu verstehen, dessen Körper durch Gelenke miteinander verbunden sind /Sch10/. Serielle Kinematiken bei Werkzeugmaschinen weisen mehrere Besonderheiten auf:

a. Es handelt sich stets um offene kinematische Ketten
b. Die Gelenke besitzen stets den Freiheitsgrad 1
c. Alle Gelenke sind angetrieben
d. Von praktischer Relevanz sind nur Schub- und Drehgelenke /Sta09/.

Eine kinematische Kette ist dabei entweder werkzeug- oder werkstücktragend. Weitere Peripherie (z.B. Werkzeugwechselsystem) wird hier nicht betrachtet.

Aus den Besonderheiten a und b resultiert, dass die Anzahl der Gelenke der Anzahl der Freiheitsgrade der kinematischen Kette entspricht:

$$n_{Freiheitsgrad\ gesamt} = \sum_{n_{Gelenke}}^{i=1} n_{Freiheitsgrad_i} = \sum_{n_{Gelenke}}^{i=1} 1 = n_{Gelenke} \qquad (2.1)$$

Die Besonderheiten b und d haben des Weiteren zur Folge, dass stets entweder nur eine translatorische (Schubgelenk) oder rotatorische Gelenkbewegung (Drehgelenk) möglich ist. Aus c und Bedingung 2.1 resultiert, dass die Pose des Endeffektors und aller Zwischenglieder berechnet werden kann.

Eine kinematische Kette kann, wie der Name schon sagt, durch Aneinanderreihung der verschiedenen Gelenktypen nachgebildet werden.

Damit alle denkbaren Konfigurationen einer realen Kette umsetzbar sind, müssen neben der Anzahl der Glieder, ihrer Reihenfolge, der Art auch ihre Lage und die Orientierungen der Glieder zueinander veränderlich sein (z.B. für eine Horizontalfräsmaschine). Ebenso sollte die Möglichkeit, mehr als eine Achskette nachbilden zu können, bestehen (z.B. für Bearbeitungszentren mit getrennten Ketten für Werkzeug und Werkstück oder mehreren Spindeln).

2.1 Modularität

Die Modularität soll die freie Gestaltbarkeit der kinematischen Ketten gewährleisten. Hierzu werden nicht die Gelenke in den Vordergrund gestellt sondern die Achsen, welche real den Baugruppen entsprechen. Diese Nachbildung ist realitätsnäher und hat zur Folge, dass die Lage der Achsen zueinander einstellbar ist, ohne dass gesonderte Parameter herangezogen werden müssen wie z.B. in der D-H-Konvention (*Denavit-Hartenberg*) üblich /Den55/. Die Beweglichkeit des Modells (und damit einer Achskette) wird durch die Zerlegung einer Achse in zwei Achsmodule erreicht, deren Translation oder Rotation zueinander die Gelenkfunktion übernimmt. Es gibt drei unterschiedliche Module: die Achskette (enthält eine oder mehrere Achsen), die Achse (enthält zwei Achsmodule) und das Achsmodul (Abb. 2.1.1).

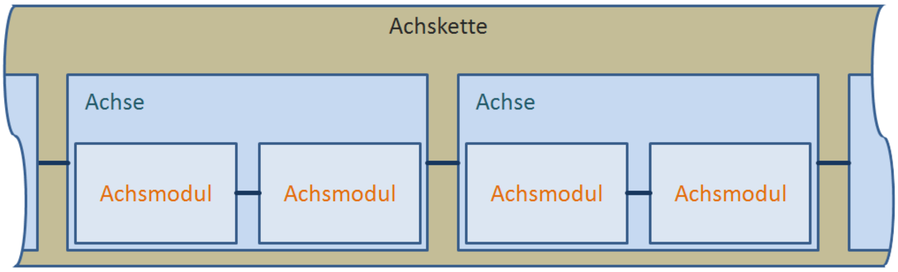

Abb. 2.1.1: Aufbau einer Achskette

2.2 Kinematik eines Achsmoduls

Ein Achsmodul wird hierzu über einen Null- und einen Anschlusspunkt beschrieben (Abbildung 2.2.1), deren Lage zueinander über den Translationsvektor $\overrightarrow{np}_{trans}$ definiert ist, welcher in dem achsmoduleigenen KOS (*Koordinatensystem*) liegt.

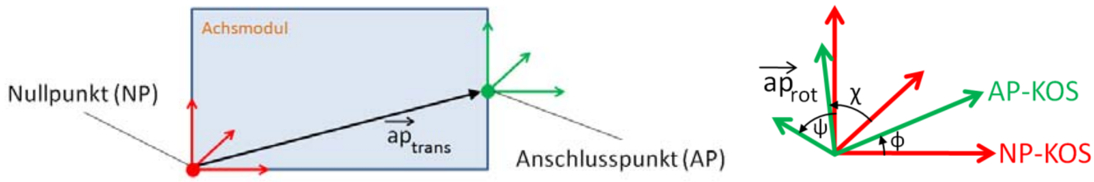

Abb. 2.2.1: Konvention der Koordinatensysteme für ein Achsmodul

Ebenso verhält es sich für eventuelle Rotationen des Anschlusspunkt-KOS in Bezug zum Nullpunkt-KOS, welche durch den Vektor $\overrightarrow{ap}_{rot}$ beschrieben ist. Dessen drei Komponenten stellen dabei die Rotationswinkel um die drei NP-KOS-Achsen dar $\overrightarrow{ap}_{rot} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \\ \psi \end{pmatrix}$, die der Drehkonvention X, Y‘, Z“ folgen.

Das Vektorpaar $\overrightarrow{ap} = \{\overrightarrow{ap}_{trans}, \overrightarrow{ap}_{rot}\}$ beschreibt damit die Lage des Anschlusspunktes und die Orientierung des darin seinen Ursprung habenden KOS eines Achsmoduls. Das Vektorpaar $\overrightarrow{ap}$ ist dabei unveränderlich und beschreibt die Achsmodulkonstellation.

2.3 Kinematik einer Achse

Um die Lage zweier Achsmodule zueinander beschreiben zu können, wird die bereits erläuterte Konvention auch auf die Lage und Orientierung des Nullpunkt-KOS im Anschlusspunkt-KOS des davor liegenden Achsmoduls angewendet (Abb. 2.3.1): $\overrightarrow{np} = \{\overrightarrow{np}_{trans}, \overrightarrow{np}_{rot}\}$

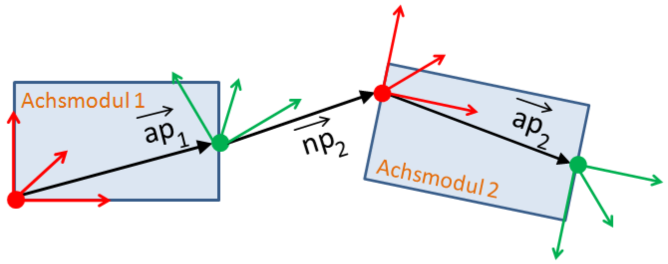

Abb. 2.3.1: Beschreibung von Lage und Orientierung zweier Achsmodule

Eine Achse wird aus zwei Achsmodulen gebildet, einem Basis- und einem Mobilteil. Der Basisteil, ist das dem Ursprung der kinematischen Kette näher gelegene Achsmodul. Durch Definition eines Vektorpaares $\overrightarrow{gel}$ vom gleichen Typ wie $\overrightarrow{ap}$ und $\overrightarrow{np}$ kann das notwendige Gelenk zwischen Basis- und Mobilteil beschrieben werden: $\overrightarrow{gel} = \{\overrightarrow{gel}_{trans}, \overrightarrow{gel}_{rot}\}$. Das Vektorpaar $\overrightarrow{gel}$ umfasst dabei die Translation und Rotation des Vektorpaars $\overrightarrow{np}_{mobil}$. Eine Achse lässt sich damit wie in Abbildung 2.3.2 dargestellt beschreiben.

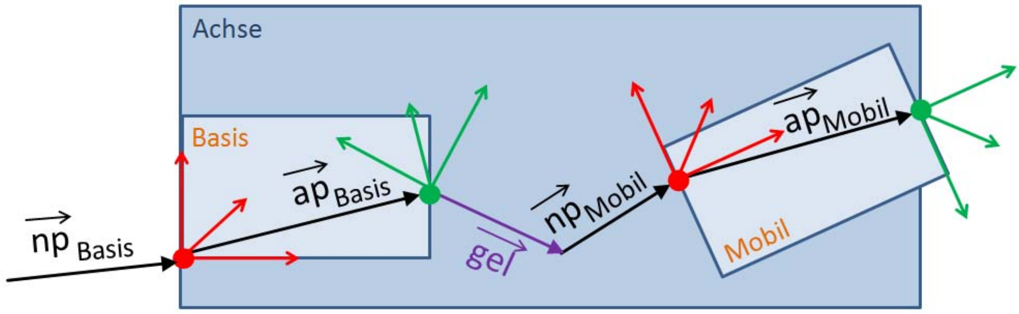

Abb. 2.3.2: Beschreibung einer Achse

Zur Wahrung von Bedingung b wird gefordert, dass $\overrightarrow{gel} \in \{\overrightarrow{gel}_{trans}, \overrightarrow{gel}_{rot}\}$. Hieraus ergibt sich: $AP_{Achse} = AP_{Basis}$ sowie $NP_{Achse} = NP_{Mobil}$.

2.4 Kinematik einer Achskette

Eine Achskette setzt sich aus mindestens einer, meistens jedoch mehreren, Achsen zusammen (Abb. 2.4.1). Da die benötigten Freiheitsgrade in den Achsen realisiert werden (wie in der Realität auch), muss die Verbindung der Achsen zueinander fest sein. Die Kinematik einer Achskette kann also mit der zwischen zwei Achsmodulen verglichen werden.

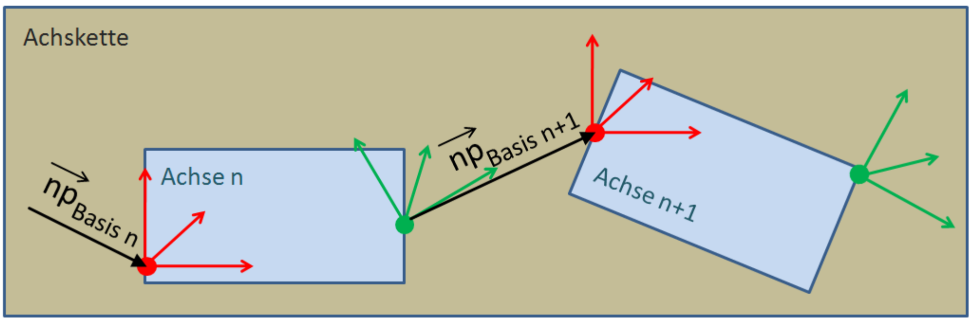

Abb. 2.4.1: Beschreibung einer Achskette

Für eine Achskette mit *k* Achsen gilt daher: $NP_{Achskette} = NP_{Achse\ 1}$ sowie $AP_{Achskette} = AP_{Achse\ k}$.

2.5 Durchgängigkeit

Die geforderte Modularität bedingt, dass der Gelenktyp einer Achse sowie deren Anzahl bei Programmstart unbekannt sind. Um dennoch eine allgemeine Beschreibung der gesamten Kinematik zu ermöglichen, werden die grundsätzlich möglichen Translationen und Rotationen für eine Achse mittels homogener Koordinaten /Brü01/ in einer einzigen 4 x 4 Matrix *M* vereint. Mit der grundlegenden Rotationsmatrix $R_{XY'Z''}$, die sich aus der Drehkonvention (siehe 2.2) ergibt, und einem grundlegenden Translationsvektor $\vec{t}$, kann die Transformation, die ein Vektorpaar vom Typ $\overrightarrow{ap}$ bewirkt wie folgt geschrieben werden:

$$\underline{M} = \vec{t} + \underline{R}_{XY'Z''} \rightarrow \underline{M} = \underline{TR}_{XY'Z''} \text{ mit}$$

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und}$$

$$\underline{R}_{XY'Z''} = \begin{bmatrix} \cos\chi\cos\psi & -\cos\chi\sin\psi & \sin\chi & 0 \\ \cos\varphi\sin\psi + \cos\psi\sin\varphi\sin\chi & \cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\sin\chi\sin\psi & -\cos\chi\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi\sin\psi - \cos\varphi\cos\psi\sin\chi & \cos\psi\sin\varphi + \cos\varphi\sin\chi\sin\psi & \cos\varphi\cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Durch die einheitliche Formulierung und Parametrisierung der Relationen aller Module zueinander kann die Transformationsmatrix $\underline{M}$ durchgängig für die Lage- und Orientierungsbeschreibung aller Module angewendet werden. Dazu muss lediglich das jeweils zugehörige Vektorpaar, das die Relation zwischen zwei gleichartigen Modulen beschreibt, übergeben werden:

$$NP_{Modul\,n+1} = \underline{M}(\overrightarrow{np}_{trans}, \overrightarrow{np}_{rot})AP_{Modul\,n} \text{ bzw. } AP_{Modul} = \underline{M}(\overrightarrow{ap}_{trans}, \overrightarrow{ap}_{rot})NP_{Modul}$$

Für die Verbindung zwischen den beiden Achsmodulen einer Achse gilt dagegen aufgrund der Gelenkfunktion:

$$NP_{Mobil} = \underline{M}'(\overrightarrow{gel}, \overrightarrow{np}_{Mobil})AP_{Basis} \text{ mit}$$

$$\underline{M}' = \underline{M}(\overrightarrow{gel}_{trans}, \overrightarrow{gel}_{rot})\,\underline{M}(\overrightarrow{np}_{Mobil\,trans}, \overrightarrow{np}_{Mobil\,rot}).$$

Die Transformation für eine Achse lautet demnach

$$\underline{M}_{Achse} = \underline{M}(\overrightarrow{np}_{Basis})\underline{M}(\overrightarrow{ap}_{Basis})\underline{M}'(\overrightarrow{gel}, \overrightarrow{np}_{Mobil})\underline{M}(\overrightarrow{ap}_{Mobil}).$$

Der Anschlusspunkt einer beliebigen Achse kann damit über

$$AP_{Achse\,n} = \prod_{i=1}^{n} \underline{M}_{Achse\,i}$$

beschrieben werden.

3 Umsetzung

3.1 Konfigurationsschnittstelle

Um die Konfiguration der darzustellen WZM zu kennen und übergeben zu können, erfolgt die Parametrisierung ihrer Kinematik. Hierzu werden grundsätzlich Informationen zur Art der WZM benötigt (Abb. 3.1.1).

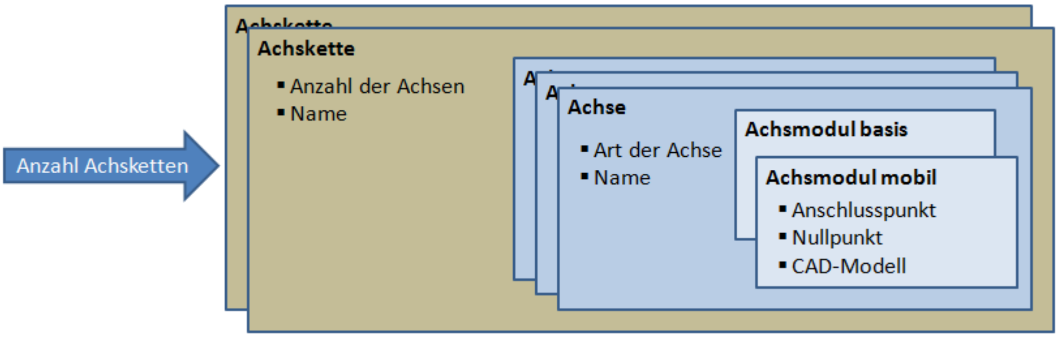

Abb. 3.1.1: benötigte Informationen je Komponente

Diese Informationen werden über eine Konfigurationsdatei bereitgestellt, welche hierarchisch aufgebaut ist. Die Kinematik einer seriellen WZM ist damit vollständig parametrisiert.

3.2 Performance

Durch den hierarchischen Aufbau der seriellen Kinematik nimmt der Berechnungsaufwand mit Länge der Achskette zu. Durch das achsbezogene Speichern der Transformationsmatrizen kann bei einer Achsbewegung auf die Neuberechnung vorgelagerter Achsen verzichtet werden. Für einen theoretischen Gelenkarmroboter mit 50 Gelenken und einen Endeffektor (Abb. 3.2.3 zeigt einen vergleichbaren Roboterarm mit 7 Gelenken) wurden die Berechnungsdauern für eine Achsbewegung in allen Gelenken gemessen. Es zeigt sich ein linearer Anstieg.

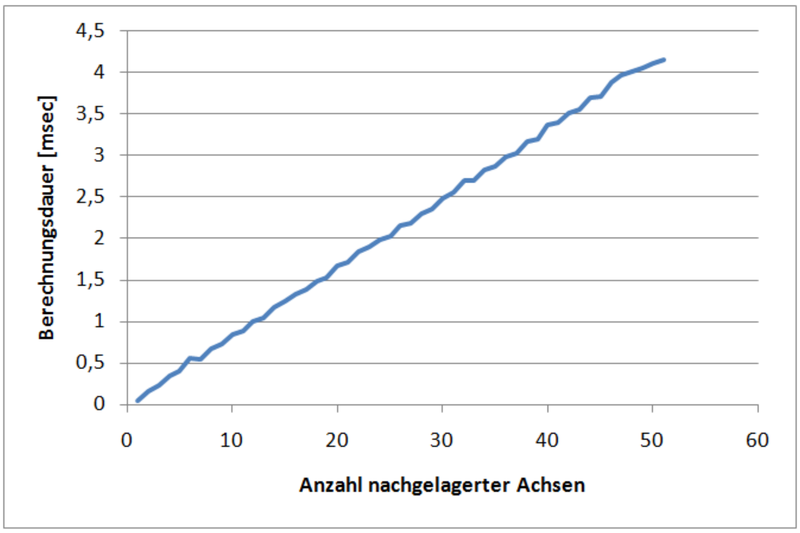

Abb. 3.2.1: Entwicklung des Berechnungsaufwandes am Beispiel eines Roboterarms mit 50 Gelenken

Insgesamt liegt die Prozessorlast bei dem Testsystem (Core2Duo E6550, 3 GB RAM @ 800 MHz, Windows 7 32bit) für eine Bildwiederholrate von 60fps (Frames Per Second) im Bereich von 1% für eine gängige WZM mit nicht mehr als 5 Achsen (Abb. 3.2.2).

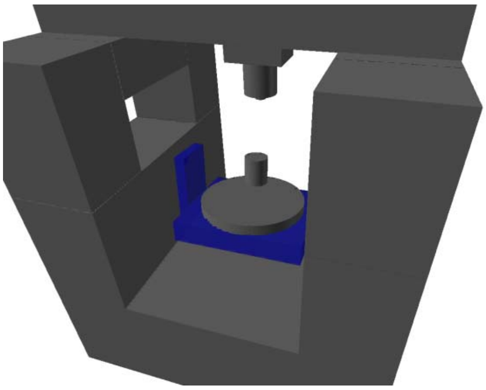

Abb. 3.2.2: A-C-Maschine

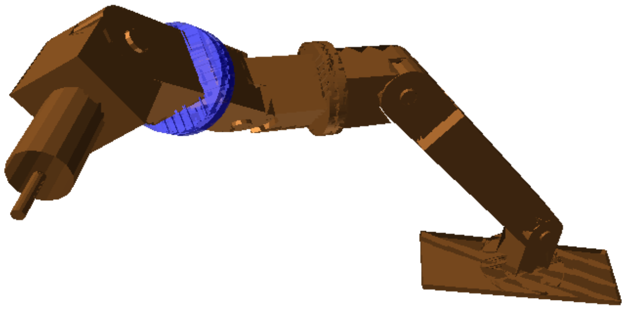

Abb. 3.2.3: Gelenkarmroboter

Literatur

/Per09/ Spanende Werkezugmaschinen, Bozina Perovic; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009; ISBN 978-3-540-89951-8

/Sch10/ Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen; Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010; ISBN 978-3-540-89313-4

/Sta09/ Robotik mit MATLAB; Georg Stark; Fachbuchverlag Leipzig, 2009; ISBN 978-3-446-41962-9

/Den55/ J. Denavit and R.S. Hartenberg; A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices; Trans ASME J. Appl. Mech; Vol. 23; Page 215-221; 1955

/Brü01/ Computergrafik und Geometrisches Modellieren; Beat Brüderlin, Andreas Meier; B.G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001; ISBN 3-519-02948-0