

8 Zusammenfassung

Um den Einsatz von freiprogrammierbaren Handhabungsgeräten in der industriellen Fertigung zu steigern, ist die Genauigkeit der Geräte beim Positionieren und Orientieren bei gleichzeitig höheren Arbeitsgeschwindigkeiten zu verbessern. Da bei der Neuauslegung von Handhabungsgeräten die damit verbundenen Probleme nicht alle gelöst werden können, sind weiterhin Maßnahmen zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens an bestehenden Geräten erforderlich. Zu diesem Zweck wurden in der vorliegenden Arbeit eine Reihe von Verfahren vorgestellt, die sich mit steuerungstechnischen Maßnahmen und solchen, die im Rahmen der Off-line-Bahnplanung angewendet werden können, beschäftigen.

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war es, allgemeingültige Verfahren zu entwickeln, die für alle Gerätestrukturen aus offenen kinematischen Ketten anwendbar sind. Außerdem wurde besonderen Wert auf die Verwendung von realitätsnahen Modellen zur Beschreibung der Kinematik und Dynamik von Handhabungsgeräten gelegt, da diese einen bedeutenden Einfluß auf die Verwendbarkeit der Berechnungsergebnisse zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens haben.

Eine hohe Positionier- und Orientierungsgenauigkeit entlang der Bahn setzt eine genaue Kenntnis der für die Berechnungen erforderlichen tatsächlichen kinematischen und dynamischen Kenndaten voraus. Diese weichen aufgrund von unvermeidbaren Fertigungstoleranzen von den theoretisch vorliegenden Konstruktionsdaten ab. Fehleranalysen zeigen, daß an die Genauigkeit der Ermittlung dieser gerätespezifischen Daten hohe Anforderungen zu stellen sind.

Als erstes wurden deshalb Verfahren zur einfachen, wirtschaftlichen und genauen Bestimmung der toleranzbehafteten kinematischen und dynamischen Kenndaten von Handhabungsgeräten entwickelt. Wie sich zeigte, war zur Beschreibung der kinematischen Struktur des zu untersuchenden Handhabungsgerätes die Anwendung der Hartenberg-Denavit-Notation besonders sinnvoll. Darauf aufbauend wurde das Verfahren zur kinematischen Parameteridentifikation entwickelt. Die bei der Aufstellung der Bestimmungsgleichungen vorgenommene Vernachlässigung von Termen höherer als erster Ordnung führte auf ein lineares Gleichungssystem, welches zunächst singular war. Durch die Elimination linear abhängiger Spalten konnte das Gleichungssystem in eine reguläre Form überführt werden. Nach einer Reihe von weiteren Maßnahmen, die zur Verbesserung der numerischen Kondition des Gleichungssystems notwendig

waren, konnte die Bestimmung der unbekannt kinematischen Parameter auf iterativem Wege erfolgen. Dazu wurde das in jedem Iterationsschritt auftretende lineare Gleichungssystem mit Hilfe des Gaußschen Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate gelöst. Durch die vorgestellte Vorgehensweise konnte insbesondere die problematische Parameteridentifikation von Gerätestrukturen mit parallel zueinander angeordneten Achsen der gliedfesten Koordinatensysteme gelöst werden.

Als Eingangsgrößen des Identifikationsalgorithmus wurden die in verschiedenen Bahnpunkten gemessene räumliche Anordnung des Effektors und die zugehörigen Gelenkvariablen verwendet. Es konnte erstmalig ein Algorithmus vorgestellt werden, der sowohl durch Vorgabe von Positions- und Orientierungsdaten als auch durch alleinige Vorgabe der Positionsdaten oder der Entfernungsdaten zwischen angefahrenen Raumpunkten eine kinematische Parameteridentifikation ermöglicht. Dabei wurde festgestellt, daß mit den Positions- und Orientierungsdaten des Effektors in den verschiedenen Raumpunkten eine Ermittlung sämtlicher kinematischer Parameter des Handhabungsgerätes vorgenommen werden konnte. Im Gegensatz dazu war mit den reinen Positionsdaten bzw. mit den Entfernungsdaten eine Bestimmung des Kreuzungswinkels des letzten Gliedes nicht möglich. Bei praktischen Anwendungen kann darauf jedoch häufig zugunsten des wesentlich geringeren Meßaufwandes verzichtet werden.

Die Simulationsrechnungen zeigten, daß trotz einer Linearisierung des Gleichungssystems die kinematischen Parameter des Handhabungsgerätes numerisch genau bestimmt werden konnten. Im praktischen Einsatz müssen jedoch geringfügige Abweichungen in Kauf genommen werden, da die Meßwerte mit unvermeidlichen Meßfehlern behaftet sein werden. Es konnte außerdem ein stabiles Konvergenzverhalten des Identifikationsalgorithmus festgestellt werden.

Ausgehend von einer vollständigen Beschreibung der Dynamik von Handhabungsgeräten, wurden die Bestimmungsgleichungen zur Identifikation der dynamischen Parameter der Glieder und der Last aufgestellt. Dabei wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, die ohne eine Vernachlässigung von Termen auf ein lineares Gleichungssystem führt. Da ansatzbedingt einige dynamische Parameter nicht oder nur in Linearkombination mit anderen dynamischen Parametern bestimmbar sind, war das entstandene Gleichungssystem zunächst singular. Auch hier konnte eine spezielle numerische Vorgehensweise entwickelt werden, die ein reguläres und gut konditioniertes Gleichungssystem erzeugte. Zur numerischen

Lösung dieses Gleichungssystems erwies sich das Verfahren der konjugierten Gradienten als besonders geeignet.

Das Verfahren zur dynamischen Parameteridentifikation der Glieder setzt voraus, daß Meßwerte der Antriebskräfte und -momente sowie der zeitlichen Verläufe der Gelenkvariablen vorliegen. Das Verfahren ermöglicht die Verwendung von Meßwerten, die während einer beliebigen Bewegung der Glieder des Handhabungsgerätes aufgenommen werden. Damit sind im Gegensatz zu einer Reihe bereits bekannter Arbeiten keine speziellen Testbewegungen der Glieder erforderlich.

Bei der Identifikation der dynamischen Parameter der Last wurde ein Verfahren vorgestellt, welche neben der Masse, der Schwerpunktlage und dem Tensor der Massenträgheitsmomente noch die Lage der Hauptträgheitsachsen und die Hauptträgheitsmomente bestimmt. Mit diesen Kenngrößen konnte eine Objektidentifikation und eine Lageidentifikation des aufgenommenen Handhabungsobjektes relativ zum Greifer vorgenommen werden. Als Eingangsgrößen zur Identifikation der Lastparameter wurden die von der Last auf das letzte Glied des Handhabungsgerätes wirkenden Kräfte und Momente verwendet, die mit Hilfe eines am letzten Geräteglied befindlichen Sechs-Achsen-Kraftsensors gemessen werden können.

Auch hier machten die Simulationsrechnungen deutlich, daß sich die dynamischen Parameter der Glieder und der Last numerisch genau bestimmen lassen und ein stabiles Konvergenzverhalten des Algorithmus vorliegt. Der im praktischen Einsatz zu erwartende Einfluß der Meßfehler auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse kann durch die Aufnahme einer größeren Anzahl von Meßwerten in akzeptablen Grenzen gehalten werden. Ein besonderer Vorteil des vorgestellten Identifikationsalgorithmus besteht darin, daß keine Startwerte für die zu bestimmenden dynamischen Parameter vorgegeben werden müssen.

Durch die Verwendung der dynamischen Programmierung war es möglich, ein Verfahren zur Optimierung des Geschwindigkeitsverlaufes entlang einer vorgegebenen Bahn zu erstellen, welches beliebige Optimierkriterien in beliebig zu gewichtender Kombination und jede denkbare Restriktion berücksichtigen kann. Durch den modularen Aufbau des Optimierprogramms ist es für den Benutzer auf einfache Weise möglich, Optimierkriterien und Restriktionen in den Algorithmus einzufügen. In der vorliegenden Arbeit wurden als Optimierkriterien die minimale

Zeit, die minimale Antriebsarbeit und eine beliebig zu gewichtende Kombination dieser beiden Kriterien ausgewählt. Als gerätespezifische Restriktion wurde die Begrenzung der Antriebskräfte und -momente sowie der Antriebsgeschwindigkeiten eingesetzt. Als aufgabenspezifische Restriktion wurde die Beschränkung der Bahngeschwindigkeit berücksichtigt, wie sie beispielsweise beim Klebstoffauftragen zu beachten ist. Um die Schwingungen der Gerätestruktur auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, sollten die Änderungen der Antriebsmomente von einem Bahnpunkt zum nächsten nicht zu groß sein. Deshalb wurden als weitere Restriktion noch Grenzen für die Stärke der Momentenänderung der Antriebe berücksichtigt, was gleichbedeutend mit einer Begrenzung des Rucks ist. Durch die Entwicklung eines effizienten Berechnungsverfahrens konnte die Rechenzeit zur Bestimmung des optimalen Bahngeschwindigkeitsverlaufes erheblich verringert werden. Da außerdem auf eine effiziente Datenorganisation geachtet wurde, konnte die Anwendung des Optimierprogrammes auf einem Tischrechner (PC) sichergestellt werden.

Durch die Forderung nach hohen Bahngeschwindigkeiten und hohen Genauigkeiten wurde eine Betrachtung der Verformungen der elastischen Glieder und Antriebssysteme notwendig. Zur realitätsnahen Beschreibung der geometrischen und dynamischen Eigenschaften eines Gliedes wurde dieses in eine beliebig vorzugebende Anzahl von Gliedelementen zerlegt. Dazu werden vom Programm eine Reihe von geometrischen Grundkörpern zur Verfügung gestellt, mit denen der Benutzer den Aufbau eines Gliedes beschreiben kann. Diese Vorgehensweise war außerdem erforderlich, um sämtliche Belastungen, die zu einer Verformung der Gerätestruktur führen, zu erfassen. Durch die Bestimmung aller auf die Gliedelemente wirkenden Kräfte und Momente konnte der gesamte Belastungszustand eines Gliedes angegeben werden, woraus sich die Verformung des Gliedes und auch des Antriebssystems ermitteln ließ. Aus der Superposition der einzelnen Glied- und Antriebssystemverformungen wurde die Bahnabweichung für den effektorfesten Bezugspunkt bestimmt. Darauf aufbauend wurde ein Verfahren entwickelt, welches, ausgehend von den bekannten Gelenkvariablen des Starrkörpermodells, neue Gelenkvariablen berechnet, die den Effektor in die gewünschten Positionen und Orientierungen entlang der Bahn überführt. Da die dabei auftretenden nichtlinearen Gleichungen nicht geschlossen analytisch lösbar waren, wurde zur allgemeinen Lösung dieses Problems eine iterative Vorgehensweise gewählt.