8 Anwendung der Verfahren zur Steigerung der Pose-Genauigkeit

Nachdem im vorhergehenden Kapitel Verfahren zur Steigerung der Pose-Genauigkeit entwickelt und per Simulation validiert wurden, wird deren praktischer Einsatz in diesem Kapitel dargestellt. Es werden wiederum die beiden Verfahren Pose- und Abstandsauswertung getrennt voneinander vorgestellt.

8.1 Poseauswertung

8.1.1 Parameteridentifikation

Zur Parameteridentifikation wurde der Kalibrierkörper vor dem zu untersuchenden Industrieroboter aufgestellt und die einzelnen MPKS des Kalibrierkörpers per Teach-In programmiert. Mit diesem Programm wurde der Kalibrierkörper anschließend mehrfach durch den Industrieroboter abgefahren, d.h. die einzelnen MPKS wurden angefahren, und die Pose zwischen ihnen und dem MKKS wurde mit dem Meßkopf gemessen.

Mit aus Stellwerten und gemessenen Posen bestehenden Datensätzen wurden anschließend die Parameter der gesamten kinematischen Kette bestimmt. Da diese Versuche mehrfach wiederholt wurden, konnten die Verteilungen der einzelnen Parameter ermittelt werden. Die Anwendung der in Kapitel 6 beschriebenen Werkzeuge zur Analyse von Dichtefunktionen ergab, daß die identifizierten Parameter als normalverteilt betrachtet werden können.

Die Güte der Identifikation selbst kann mit der minimal erreichten Qualität beschrieben werden. Eine optimale Identifikation ist hier in der Lage, diese Qualität bis auf Null zu reduzieren. Aufgrund von unvermeidbaren Meßunsicherheiten und Effekten, die durch das gewählte Modell nicht beschrieben werden, ist dies jedoch in der Praxis nicht zu erreichen. Ein optimales Modell muß allerdings im Gegensatz zu anderen Modellen zu einem minimalen Qualitätswert führen. Dieses kann zum Vergleich unterschiedlicher Modelle herangezogen werden: Das aufgrund von theoretischen Überlegungen gebildete, minimale Modell (Modell C) kann mit weiteren Modellen verglichen werden. Zum Vergleich wurde ein Modell A mit allen kinematischen Parametern, ein für den dreidimensionalen Fall vollständiges Modell B mit 20 Parametern und ein Modell D unter Annahme paralleler Achsen gebildet (Tabelle 8.1).

Modell	Parameteranzahl	Beschreibung
A	36	Für jeden der sechs Gelenkübergänge werden sechs Parameter benutzt, so daß eine beliebige Anordnung der Koordinatensysteme zueinander möglich ist (Bild 7.2).
B	20	Für den dreidimensionalen Fall minimales Modell (Tabelle 7.3).
C	18	Minimales Modell für einen zweidimensionalen Kalibrierkörper (Tabelle 7.4).
D	14	Vereinfachtes Modell, welches die Transformation R und K vollständig beschreibt, den Industrieroboter jedoch nur unter der Annahme paralleler Achsen abbildet.

Tabelle 8.1: Modellbeschreibungen

Die mit diesen Modellen erreichten relativen Qualitäten (Tabelle 8.2) bestätigen die Richtigkeit des minimalen Modells C. Mit diesem Modell konnte eine ebenso hohe Qualität wie mit dem Gesamtmodell A oder dem für den dreidimensionalen Fall minimalen Modell B trotz der geringeren Parameteranzahl erreicht werden. Demgegenüber ist die mit Modell D erreichte Qualität sowohl bezüglich der Orientierung als auch der Position im dreidimensionalen Raum deutlich schlechter. Lediglich bei den Qualitäten in der x-y-Ebene ist dieses Modell genauso gut wie die anderen Modelle. Dieses kann dadurch erklärt werden, daß Nichtparallelitäten der Achsen des Industrieroboters in der x-y-Ebene nur zu kleinen, in z-Richtung aber zu großen Abweichungen führen. Somit könnte also Modell D genutzt werden, wenn lediglich die Pose-Genauigkeit in der x-y-Ebene zu steigern ist.

Modell	Parameter-anzahl	relative Qualität	x-y-Ebene in µm			Dreidimensional in µm			max(ψ θ φ) in "		
			Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert
A	36	1,0	65,9	32,8	116,0	83,0	28,0	133,0	0,0	274,0	373,0
B	20	1,0	78,2	38,0	135,2	92,6	34,4	149,9	0,0	274,0	373,0
C	18	1,0	64,4	32,2	118,4	81,7	27,5	135,1	0,0	274,0	373,0
D	14	15,2	64,2	32,2	117,9	158,8	87,9	300,6	0,1	285,2	639,8

Tabelle 8.2: Vergleich unterschiedlicher Modelle bei der Parameteridentifikation

Für das minimale Modell sollen die Parameter mit ihren Unsicherheiten eingehender untersucht werden. Dazu sind die für einen typischen Fall berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen der voneinander unabhängigen Parameter in den Tabellen 8.3 und 8.4 dargestellt.

Trans-formation	x in mm	y in mm	z in mm	ψ in '	θ in '	ϕ in '
R	-142,813	-688,034	(-500)	-1,022	1,219	
A_1			(800)	-1,082	3,808	-35,973
A_2	444,300				6,076	-117,619
A_3	355,305		(-240)	-0,107		
A_4						
K	4,591	4,618	-180,906	0,030	-0,350	4,672

Tabelle 8.3: Mittelwerte der identifizierten Parameter
(in Klammern gesetzte Werte sind konstant)

Ein Vergleich der Mittelwerte der identifizierten Parameter mit den idealen Parametern entsprechend Tabelle 7.1 kann nur bedingt durchgeführt werden, da einzelne reale Abmessungen in dem Modell in einem einzelnen Parameter zusammengefaßt sind. Dieses trifft z.B. bei der Höhe des Industrieroboters in z-Richtung zu. Aufgrund der nahezu parallelen Achsen können alle die Höhe des Industrieroboters beschreibenden Parameter in der letzten Transformation (K) zusammengefaßt werden.

Trans-formation	x	y	z	ψ	θ	ϕ
R	4,4 µm	2,2 µm		0,4"	1,2"	
A_1				0,8"	1,1"	1,8"
A_2	5,7 µm				2,0"	1,8"
A_3	3,6 µm			1,7"		
A_4						
K	2,5 µm	3,8 µm	2,6 µm	1,1"	2,8"	13,2"

Tabelle 8.4: Standardabweichungen der identifizierten Parameter

Verglichen werden können als einzige translatorische Parameter die Armlängen: Relativ zum idealen Modell (Tabelle 7.1) weist der erste Arm eine Abweichung von 0,700 mm und der zweite Arm von 0,305 mm auf. Allein diese Differenzen können ohne Kompensation zu einer Positionsabweichung von bis zu einem Millimeter führen. Bei den rotatorischen Parametern können die Gelenk-Offsets sowohl der ersten als auch der dritten Achse nicht separat bestimmt werden: Bei der ersten

Achse ist dieser Offset direkt mit der Orientierung der Aufstellung überlagert. Bei der dritten Achse überlagern sich alle Parameter, die die Ausdehnung des Industrieroboters in z-Richtung beschreiben, wie Aufstellung, Offset und Meßsystem, in einem einzelnen Parameter.

Demgegenüber kann der Gelenkoffset der zweiten Achse direkt diskutiert werden: Er beträgt 1,96°. Damit führt der Offset der zweiten Achse ohne Kompensation zu einer erheblichen Positionsabweichung von bis zu 12 mm. Die Sollwerte aller weiteren rotatorischen Parameter sind Null, da im Idealfall alle Achsen parallel zueinander stehen. Anhand der identifizierten Parameter ist ersichtlich, daß die Orientierungsabweichungen der Achsen in der Größenordnung von einigen Winkelminuten liegen und damit selbst diese Abweichungen zu Positionsabweichungen in der Größenordnung von einigen zehntel Millimetern führen können.

Die Qualität des identifizierten Modells kann auch anhand der Streuungen der identifizierten Parameter beurteilt werden: Da die Standardabweichungen der Parameter (Tabelle 8.4) verglichen mit den Unterschieden zwischen identifiziertem und idealem Modell klein sind, kann angenommen werden, daß mit einer ausreichenden Güte identifiziert wurde. Eine Fehlerfortpflanzungsanalyse mit den Parameterunsicherheiten als Eingangsdaten ergibt unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Parameter voneinander eine Pose-Genauigkeit mit Standardabweichungen von ca. 3 bis 10 µm in der x-y-Ebene, 3 µm in z-Richtung, 3" um die x- und y-Achse und 11" um die z-Achse. Ein Vergleich dieser Pose-Genauigkeit mit der vermessenen Pose-Wiederholgenauigkeit (Kapitel 6) ergibt, daß auch von diesem Standpunkt aus die Standardabweichungen als klein anzusehen sind.

8.1.2 Pose-Genauigkeit

Nachdem bisher die identifizierten Parameter analysiert wurden, ist im folgenden die erreichbare Pose-Genauigkeit zu bestimmen. Dazu sind Posen, die nicht zur Identifikation herangezogen wurden, programmiert anzufahren, und es ist festzustellen, mit welcher Genauigkeit diese erreicht werden können. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz mit einem Kalibrierkörper ist dies, da kein globales Koordinatensystem vorhanden ist, nur über einen Umweg möglich. Dazu wird der Kalibrierkörper, nachdem er zur Parameteridentifikation vermessen wurde, im Arbeitsraum verschoben. An der so erreichten Position werden drei Eckpunkte angemessen. Mit diesen Meßdaten wird die Pose der ersten Achse bezüglich des KKS identifiziert, während die anderen Parameter festgehalten werden. Dieser so neu bestimmte Parametersatz dient dann als Grundlage, um mit den Daten des Kalibrierkörpers die noch nicht angefahrenen Eckpunkte programmiert anzufahren:

Es wird eine inverse Transformation basierend auf den identifizierten Parametern mit den durch den Kalibrierkörper vorgegebenen Zielposen durchgeführt.

Im vorgestellten Fall wird der Kalibrierkörper in der Ebene um ca. 100 mm verschoben und um ca. 3,4° gedreht.

Um das minimale Modell mit anderen Modellen zu vergleichen, werden die mit verschiedenen Modellen (Tabelle 8.1) erreichten Pose-Genauigkeiten einander gegenübergestellt (Tabelle 8.5).

Modell	Parameter-anzahl	relative Qualität	x-y-Ebene in µm			Dreidimensional in µm			max(ψ θ φ) in "		
			Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert
A	36	1,0	69,2	42,6	150,2	87,0	48,8	154,3	48,9	269,6	318,2
B	20	1,0	76,0	39,4	154,9	92,6	44,7	158,5	48,5	269,6	315,2
C	18	1,0	66,9	42,3	147,7	85,1	48,1	151,7	48,8	269,6	318,9
D	14	17,8	66,8	42,1	147,5	182,3	154,1	464,7	78,2	346,2	692,6

Tabelle 8.5: Vergleich der mit unterschiedlichen Modellen erreichten Pose-Genauigkeiten

Es ergibt sich, wie auch schon bei der Parameteridentifikation beschrieben, daß mit dem minimalen Modell C und den Modellen A und B eine nahezu identische, hohe Pose-Genauigkeit erreicht werden kann.

Punkt Nr. (siehe Bild 4.2)	Pose-Genauigkeit in der x-y-Ebene in µm	dreidimensionale Pose-Genauigkeit in µm	Pose-Genauigkeit der Orientierung um die z-Achse in '
7 l	44,1	113,1	-0,157
8 r	59,4	59,7	3,555
1 r	30,9	35,7	-9,393
2 r	96,5	100,7	2,412
3 r	147,7	151,7	5,315
4 l	93,6	142,9	0,687
6 l	30,4	39,0	-0,133
8 l	32,3	38,0	3,080
Mittelwert	66,9	85,1	0,670
Standardabw.	42,3	48,1	4,493
Maximalwert	147,7	151,7	-9,393

l: Linksarmig angefahren ($\varphi_2<0°$)
r: Rechtsarmig angefahren ($\varphi_2>0°$)

Tabelle 8.6: Gemessene Pose-Genauigkeiten

Die Pose-Genauigkeit in der x-y-Ebene ergibt bei Modell D eine gleich hohe Qualität wie bei den anderen Modellen. Bezüglich der Drehung fällt Modell D leicht und bezüglich der dreidimensionalen Positions-Genauigkeit deutlich um einen Faktor drei gegenüber den anderen Modellen ab. Damit konnte auch hier gezeigt werden, daß Modell C allen Anforderungen an ein optimales Modell genügt: Es wird mit einer minimalen Parameteranzahl eine optimale Qualität erreicht.

Die an den einzelnen MPKS des Kalibrierkörpers gemessenen Pose-Genauigkeiten sind in Tabelle 8.6 detailliert zusammengestellt.

Damit konnte eine für die meisten Fertigungs- und Montageaufgaben ausreichende Pose-Genauigkeit von im Mittel 85,1 µm erreicht werden. Selbst der Punkt, der mit der größten Abweichung angefahren wurde (Punkt 17), konnte noch mit einer ausreichenden Genauigkeit von 151 µm erreicht werden.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den in Kapitel 6 vermessenen Wiederholgenauigkeitskenngrößen, die mit maximalen Standardabweichungen von 12,7 µm und Umkehrspannen von 0,1 mm ermittelt wurden, so ergibt sich, daß das Ziel erreicht werden konnte: Die Genauigkeit liegt im Bereich der Wiederholgenauigkeit! Eine weitergehende Verbesserung der Pose-Genauigkeit ist damit kaum möglich.

8.2 Abstandsauswertung

Mit der Abstandsauswertung können - wie die Simulation gezeigt hat - die Parameter der Kinematik des Industrieroboters, ohne dessen Beziehungen zur Umgebung zu kennen, identifiziert werden. Da für die durchgeführten Versuche lediglich ein zweidimensionaler Kalibrierkörper benutzt wurde, ist nur die Identifikation des zweidimensionalen Modells mit fünf unabhängigen Parametern möglich.

Auch hier wurden die Parameter mit beliebig im Arbeitsraum des Industrieroboters plaziertem Kalibrierkörper bestimmt. Zur Prüfung der erreichten Genauigkeit wurde der Kalibrierkörper verschoben und die unbekannte Lage des ersten Koordinatensystems des Kalibrierkörpers zum Industrieroboter anhand von drei Punkten bestimmt. Anschließend können dann die restlichen Eckpunkte des Kalibrierkörpers programmiert angefahren werden. Zur Programmierung wird dabei eine auf dem identifizierten Modell basierende inverse Transformation genutzt.

Um das minimale Modell zu bewerten, wurden, wie auch bei der Poseauswertung, verschiedene Modelle genutzt. Es ergab sich für alle untersuchten Modelle eine ähnlich hohe Qualität. Der numerische Aufwand ist allerdings für das für diesen Fall minimale Modell mit fünf Parametern (Tabelle 7.8) deutlich geringer als bei den

anderen zur Kontrolle gerechneten Modellen. Bei der Parameteridentifikation wurde eine mittlere Abstandsabweichung von 35 µm mit einer Standardabweichung von 31 µm erreicht. Eine Kontrolle bei verschobenem Kalibrierkörper ergab eine mittlere Abstandsabweichung von 48 µm mit einer Standardabweichung von 40 µm. Da diese Kontrolle nur eine geringfügig schlechtere Pose-Genauigkeit ergab, ist gezeigt, daß die Abstandsauswertung mit Erfolg eingesetzt werden kann. Damit ist es möglich, Bahnen einer definierten Länge mit einer hohen Genauigkeit von einigen 1/100 mm bis zu 1/10 mm abzufahren.

Abschließend ist zu prüfen, welche Pose-Genauigkeiten beim Anfahren von einzelnen Posen erreicht werden können. Die Programmierung dieser Posen erfolgt dabei auf der Grundlage der durch die Abstandsauswertung identifizierten Parameter. Vorab ist dazu die Transformation zwischen verschobenem Kalibrierkörper und Industrieroboter zu bestimmen. Dieses erfolgt genau wie bei der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Poseauswertung: Anhand von drei Posemessungen wird die benötigte Transformation bestimmt.

Für die einzelnen Posen ergaben sich Pose-Genauigkeiten mit maximalen Abweichungen von bis zu 0,4 mm. Damit weist die Abstandsauswertung verglichen mit der Poseauswertung eine recht schlechte Pose-Genauigkeit auf. Dieses ist damit zu erklären, daß mit dem benutzten Modell die Richtungen der Drehachsen im Raum nicht bestimmt werden können. Zusammen ergeben diese nicht identifizierten Parameter die Pose-Genauigkeit in der genannten Größenordnung. Dieses Ergebnis stimmt damit auch mit der per Simulation abgeschätzten, gegenüber der Poseauswertung deutlich schlechteren Pose-Genauigkeit überein.

Für einen SCARA ist damit die vorgestellte Abstandsauswertung letztlich nur einsetzbar, wenn ein dreidimensionaler Kalibrierkörper benutzt wird. So ist es möglich, eine deutlich bessere Pose-Genauigkeit zu erreichen, da dann auch die Orientierungen der Drehachsen identifizierbar sind.