Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl. Math. Univ. Ulrich Wiest

aus Augsburg

Tag der mündlichen Prüfung:	11. Januar 2001
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. H. Wörn
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.rer.nat. H. Prautzsch

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **5**

1.1 Motivation 5

1.2 Problemstellung 6

1.2.1 Absolute Positioniergenauigkeit 7

1.2.2 Relative Wiederholgenauigkeit 8

1.3 Zielsetzung 9

1.3.1 Positioniergenauer Roboter 9

1.3.2 Wiederholgenauer Roboter 10

1.4 Gliederung der Arbeit 11

2 Stand der Forschung **12**

2.1 Einleitung 12

2.2 Roboterkalibration 12

2.2.1 Klassifizierung 13

2.2.2 Einzelachskalibration 14

2.2.3 Numerische Kalibration 15

2.2.4 Statische Kalibration 16

2.2.5 Dynamische Kalibration 18

2.3 Zellenkalibration 18

2.3.1 Werkzeug 18

2.3.2 Umgebung 19

2.3.3 Bauteil 20

2.3.4 Prozeß 21

3 Kinematische Modellierung **22**

3.1 Einleitung 22

3.2 Mathematische Grundlagen 23

3.2.1 Orthonormale Transformation 23

3.2.2 Die Winkel roll, pitch und yaw 25

3.3 Roboterkinematik . . . 26
3.3.1 Gelenktypen . . . 26
3.3.2 Mechanische Entsprechung eines Frames . . . 26
3.3.3 Beispiel für eine Transformationskette . . . 28
3.4 Modellierung geometrischer Fehler . . . 28
3.4.1 Nullagenfehler . . . 30
3.4.2 Achsenschiefstände . . . 30
3.4.3 Längenabweichungen . . . 30
3.5 Modellierung nicht geometrischer Fehler . . . 31
3.5.1 Lineare Elastizität . . . 32
3.5.2 Statische Drehmomente . . . 32
3.5.3 Algorithmus der Drehmomentberechnung . . . 34
3.6 Kompensation . . . 35
3.6.1 Inverse Kinematik . . . 35
3.6.2 Approximation . . . 35

4 Meßverfahren **38**
4.1 Einleitung . . . 38
4.2 Photogrammetrische Verfahren . . . 39
4.2.1 Vorwärtsschnitt . . . 39
4.2.2 Rückwärtsschnitt . . . 39
4.2.3 Mehrbildausgleich . . . 40
4.2.4 Réseau-Scanning-Kamera . . . 41
4.2.5 Infrarotsensor . . . 42
4.3 Tachymetrische Verfahren . . . 43
4.4 Lasertriangulationsverfahren . . . 44
4.5 Abstandsverfahren . . . 46

5 6D-Kalibrierung **47**
5.1 Einleitung . . . 47
5.2 Minimierungsaufgabe . . . 48
5.2.1 Basisnorm . . . 48
5.2.2 Residuenoperator . . . 48
5.3 Gauss-Newton-Methode . . . 49
5.4 Maßkörperprinzip . . . 50
5.4.1 Drei unbekannte Targets . . . 51
5.4.2 Mindestens drei bekannte Targets . . . 52

5.5 Startiterierte 53
5.5.1 Framekonstruktion aus Bild und Urbild 53
5.5.2 Schätzung der Roboterbasis bezüglich des Meßsystems 53
5.5.3 Schätzung des Werkzeuges bezüglich des Roboterflanschs 54
5.5.4 Schätzung des Werkzeuges bezüglich des Meßsystems 54
5.6 Numerische Resultate 54
5.6.1 Zielfunktional 54
5.6.2 Konditionierung 55
5.6.3 Meßgenauigkeit 56
5.6.4 Posegenauigkeit 57
5.6.5 Masseunabhängigkeit 60
5.6.6 Parameterwahl 62
5.7 Anwendungen 63
5.7.1 Roboterjustage 63
5.7.2 Positioniergenauer Roboter 66

6 3D-Kalibrierung 69
6.1 Einleitung 69
6.2 Meßprinzip 70
6.3 Temperaturdrift 70
6.3.1 Ursachen 70
6.3.2 Auswirkungen 71
6.3.3 Maßnahmen 72
6.4 Flexibles-Inline-Messen 73
6.5 Maßkörper 75
6.5.1 Aufbau 75
6.5.2 Posen 76
6.6 Metrische Kalibrierung 78
6.7 Drift-Kalibrierung 80
6.7.1 Driftmessung 80
6.7.2 Identifikation 80
6.7.3 Kompensation 81
6.8 Resultate 82
6.9 Industrielle Umsetzung 83

7 1D-Kalibrierung **85**

7.1 Einleitung 85

7.2 Zielfunktional 86

7.3 Äußere Iteration 86

7.4 Resultate 87

8 Software **89**

8.1 Einleitung 89

8.2 Kernel 90

8.3 Applikationen 91

9 Schlußbetrachtung **93**

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse 93

9.2 Ausblick 95

A Formelsymbole **97**

B Parameterhistogramme **99**

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Getrieben vom internationalen Wettbewerbsdruck steigen in der industriellen Fertigung die Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Produktivität der Fertigungsverfahren unaufhörlich. Zur Sicherung der Konkurrenzfähigkeit kommt der Automatisierungsindustrie, insbesondere durch den Einsatz von Industrierobotern, eine Schlüsselstellung zu.

Die fortschreitende Entwicklung der Technik hat den Industrierobotern immer neue Einsatzgebiete erschlossen. In den frühen 70er Jahren wurden Industrieroboter lediglich für einfache „Pick and Place"-Aufgaben eingesetzt, wie beispielsweise das Einlegen von Bauteilen in Pressen. In der Automobilindustrie fanden sie bald Einzug beim Punktschweißen und bei der Handhabung von schweren Karosserieteilen. Verbesserungen in der Mechanik, Steuerung, Meß- und Antriebstechnik ermöglichten den Vorstoß von Industrierobotern in immer neue Aufgabenfelder, wie Kleben, Fräsen, Entgraten, Falzen, Montieren und Bahnschweißen.

Mit der wachsenden Komplexität der Aufgaben stieg auch der Programmieraufwand nach dem Teach-In-Verfahren erheblich an, der mit einem Produktionsausfall während der Programmierzeiten verbunden ist. Durch immer kleinere Losgrößen und steigende Varianten- und Modellvielfalt erhöhte sich gleichzeitig der wirtschaftliche Druck, die Stillstandszeiten der Produktionsanlagen so gering wie möglich zu halten.

Der Einsatz von Offline-Programmiersystemen versprach eine Reduktion der Ausfallzeiten, da die Programmerstellung parallel zur Betriebszeit der Anlage erfolgen kann. Allerdings ist diesem Vorhaben bis in jüngster Vergangenheit wenig Erfolg beschieden, da die direkte Übertragung der offline erstellten Roboterprogramme auf die Fertigungszelle bisher an der mangelhaften Übereinstimmung von virtueller und realer Welt scheiterte. Aus diesem Grund sind Konzepte und Verfahren zur Roboter- und Zellenkalibrierung seit einiger Zeit Bestandteil der Forschung und werden in zunehmenden Maße auch von der Industrie eingesetzt.

Die Einhaltung moderner Qualitätsrichtlinien führte in den letzten Jahren zu einem verstärkten Einsatz optischer Sensoren zur Erfassung produktionsspezifischer Kenngrößen, wie Maßtoleranzen, Oberflächenbeschaffenheit und Funktionseigenschaften. Hierbei ist ein Trend, weg von der stichprobenartigen Qualitätskontrolle, hin zur 100% prozeßintegrierten Erfassung der Kenngrößen festzustellen. Sogenannte Inline-Meßstationen,

bestehend aus stationär angebrachten, optischen Sensoren, realisieren die kontinuierliche Prozeßüberwachung direkt in der Fertigungslinie.

Seit einiger Zeit gibt es Bestrebungen, die stationären Anlagen durch flexible Systeme, bestehend aus einem Industrieroboter mit an der Hand montierten optischen Sensor, zu ersetzen. Der Einsatz solcher Flexiblen-Inline-Meßsysteme hätte neben einer deutlichen Kostenersparnis den Vorteil, daß die Meßstrategie schnell, nämlich nur durch Anpassung des Roboterprogramms, geändert werden kann. Bisher scheiterte die Einführung dieser Systeme allerdings an der relativ hohen Temperaturdrift heutiger Industrieroboter von einigen Zehntel Millimetern.

1.2 Problemstellung

Ungeachtet der Fortschritte, die die Technik der Offline-Programmierung (OLP) in den letzten Jahren machte, werden zur Zeit etwa 95% der installierten Industrieroboter durch das Teach-In-Verfahren programmiert. Das heißt, die Produktionsprogramme werden vor Ort in der Roboterzelle durch manuelles Einrichten der Robotertrajektorien erstellt. OLP wird derzeit hauptsächlich für Erreichbarkeitsstudien und zur Erstellung des Zellen-Layouts eingesetzt. Der Aufwand für die Modellierung kompletter Roboterzellen wird kaum für die Erzeugung von Roboterprogrammen genutzt. Der Grund liegt in der schlechten Übereinstimmung von modellierter Roboterzelle und der physikalischen Realität. Wie von Geuens [7] 1997 erkannt, liegt der Schlüssel für den erfolgreichen Einsatz von OLP in der „Kalibration“.

Unter dem Begriff „Kalibration“ versteht man die Beseitigung von Lageungenauigkeiten sämtlicher Objekte, die an der Roboteraufgabe beteiligt sind. Das bedeutet, daß sich die Kalibration nicht nur auf den Roboter selbst bezieht, sondern daß auch sein Standpunkt, das benutzte Werkzeug, das zu bearbeitende Bauteil, eventuell vorhandene Zusatzachsen und sonstige periphere Schnittstellen berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 1.1 sind die wichtigsten Beziehungen zwischen einem Roboter und seiner Peripherie dargestellt.

Allgemein kann die Aufgabe „Kalibration“ in Roboterkalibration und die sogenannte Zellenkalibration unterteilt werden. Wegen der hohen Komplexität der Roboterkalibration, aber auch, weil deren Methoden und Verfahren auf die Zellenkalibration übertragen werden können, liegt der Schwerpunkt der Forschung auf dieser Disziplin.

Das Ziel der Roboterkalibration ist es, die Positioniergenauigkeit des Roboters zu verbessern, indem durch einen Kalibrationsprozeß ein genauerer funktionaler Zusammenhang zwischen den Geberwerten der antriebsseitig angebrachten Wegmeßsysteme und der tatsächlichen kartesischen Position des Endeffektors hergestellt wird.

Der Begriff „Genauigkeit“ nimmt also eine zentrale Stellung ein, so daß es zunächst erforderlich ist, die Bedeutung dieses Begriffs näher zu erklären. Man unterscheidet zwischen der absoluten Positioniergenauigkeit und der relativen Wiederholgenauigkeit eines Roboters. Die absolute, kartesische Positioniergenauigkeit gibt an, mit welcher Genauigkeit ein beliebiger, im Arbeitsraum des Roboters liegender Punkt erreicht werden kann, und zwar unabhängig von der Wahl des Weges, der Orientierung, der Beschleunigung und der Geschwindigkeit. Die relative Wiederholgenauigkeit eines Roboters beschreibt dagegen den Fehler, der sich aus dem wiederholten Anfahren der gleichen Position und

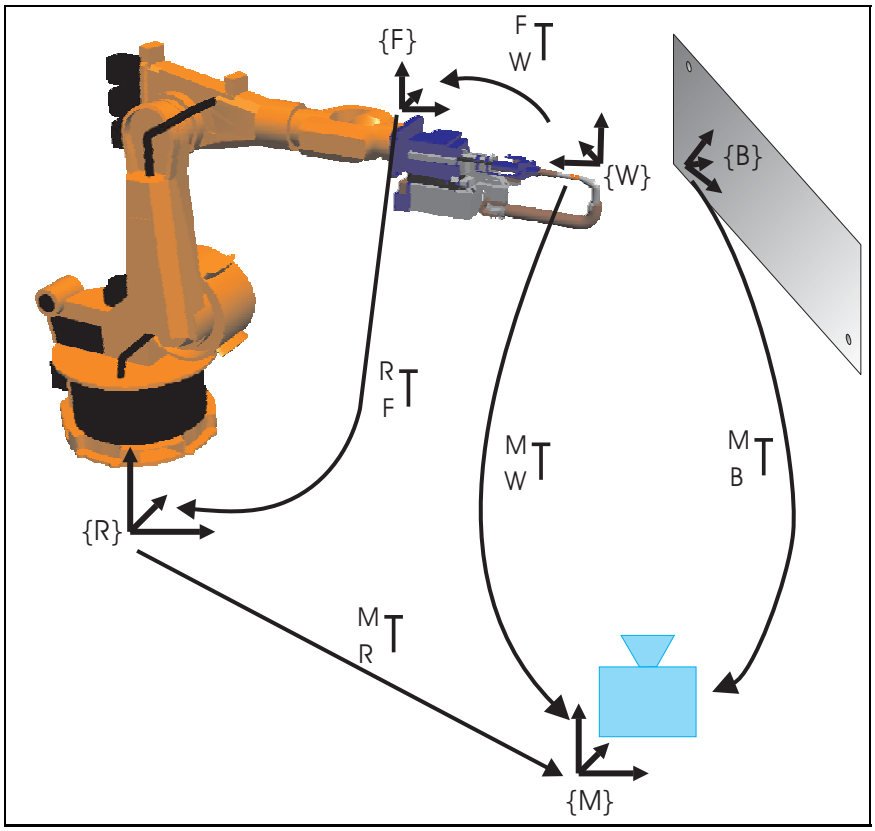


Abbildung 1.1: Transformationen zwischen Manipulator und Peripherie

Orientierung unter konstanten Bedingungen ergibt, also auf dem gleichen Weg und mit derselben Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Die absoluten Positioniergenauigkeiten der meisten heute verfügbaren Industrieroboter betragen 2 bis 10 mm, wohingegen die relativen Wiederholgenauigkeiten bei 0.03 bis 0.15 mm liegen.

1.2.1 Absolute Positioniergenauigkeit

Der deutliche Größenunterschied von absoluter Positioniergenauigkeit und Wiederholgenauigkeit weist auf systematische Fehler hin. Die Abweichungen des realen Roboters von dem idealisierten Modell, das in der Steuerung benutzt wird, werden von Eigenschaften der wirklichen Roboterstruktur verursacht. Man unterscheidet Montagefehler, die rein geometrischer Natur sind, wie Längenabweichungen, Winkelfehler und Nullagenfehler von nicht geometrischen Effekten, die in der Robotermechanik begründet sind, wie z.B. Getriebenachgiebigkeiten, Strukturelastizitäten und Getriebespiel. Solch kleine Abweichungen führen, verstärkt durch die Arm- und Werkzeuglängen, zu erheblichen Positionsabweichungen am Endeffektor (Werkzeugspitze).

Die Aufgabe der Roboterkalibration ist es nun, durch eine geeignete Modellierung und Messung, derartige Effekte zu erfassen, damit eine anschließende Kompensation möglich wird. Allgemein besteht jeder Kalibrationsprozeß aus den folgenden Schritten:

- **Modellierung**: Ein parametrisiertes Modell der Realität wird aufgestellt. Es wird entschieden, wie viele und welche Parameter das Modell umfassen soll. Je mehr

Parameter gewählt werden, desto genauer kann das Systemverhalten vorausgesagt werden, aber desto aufwendiger gestaltet sich die Parameteridentifikation.

- **Messung**: Mittels eines internen oder externen Meßsystems wird das reale Systemverhalten in Form von Meßdaten beobachtet. Das System ist derart anzuregen, daß sämtliche modellierten Parameter das Systemverhalten beeinflussen.

- **Identifikation**: Auf der Basis von Meßdaten werden passende Werte für die Modellparameter ermittelt. Diese Werte spiegeln die beobachteten Phänomene und die Abweichungen von dem nominellen Modell wider.

- **Kompensation**: Das vollständig bestimmte Modell liefert zu jedem beliebigen Zeitpunkt Vorhersagen über das Systemverhalten und wird zur Kompensation der beobachteten Anomalien herangezogen.

- **Verifikation**: Zur Validierung des Simulationssystems sollte eine erneute Messung des Systems stattfinden, wobei dessen Anregung unabhängig von derjenigen erfolgen sollte, die während der Identifikation benutzt wurde. Das beobachtete Systemverhalten sollte möglichst gut durch das identifizierte Modell vorausgesagt werden.

1.2.2 Relative Wiederholgenauigkeit

Die hohen Wiederholgenauigkeiten moderner Industrieroboter von wenigen Hundertstel Millimetern sind vor allem auf die hohen Getriebeuntersetzungen und den damit verbundenen hohen Geberauflösungen verbunden. Es werden bei rotatorischen Achsen Auflösungen von 3000 - 6000 Inkremente pro Grad erreicht. Bei einer Strukturlänge von 2 m entspricht das einer Positionstoleranz von 0.006 - 0.012 mm. Der Geberauflösung kommt daher kein signifikanter Fehlereinfluß zu. Die Abweichungen beim wiederholten Anfahren von Positionen sind vielmehr auf Lagertoleranzen und vor allem auf Haftreibungseffekte zurückzuführen, da die Getriebe zur Vermeidung von Getriebespiel vorgespannt sind. An welcher Stelle ein Getriebe beim Erreichen eines Zielpunktes zum Stillstand kommt, unterliegt keiner Systematik, sondern ist von rein stochastischen Einflüssen geprägt. Somit ist prinzipiell kein Potential vorhanden, die Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern durch Kalibration zu erhöhen, vielmehr stellt sie die untere Schranke für die Verbesserung der absoluten Positioniergenauigkeit dar.

In der Praxis weisen Industrieroboter jedoch auf Grund thermischer Störeinflüsse ein instationäres Betriebsverhalten auf. Hervorgerufen durch die Verlustleistung von Motoren und Getrieben erwärmen sich die Strukturelemente des Roboters bereits im Normalbetrieb um 20 Grad Kelvin. Die resultierende Temperaturdrift am Endeffektor beträgt bei einer 2 m großen Roboterstruktur allein rechnerisch fast einen Millimeter. Durch inhomogene Temperaturverteilung und durch die Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften treten zudem noch Verformungen und Torsionen auf, die eine Vorhersage der temperaturbedingten Abweichungen nahezu unmöglich machen.

Die Auswirkungen der Temperaturdrift von einigen Zehntel Millimetern auf konventionelle Schweißapplikationen sind wegen der mäßigen Anforderungen an die Prozeßgenauigkeit gering. Anwendungen, die eine gleichbleibend hohe Genauigkeit über die gesamte Prozeßzeit voraussetzen, sind allerdings von dem instationären Betriebsverhalten der

Industrieroboter stark betroffen. Insbesondere die neue Technik des Flexiblen-Inline-Messens verlangt konstante Wiederholgenauigkeiten der verwendeten Industrieroboter, um eine hohe Qualität der Meßergebnisse über den gesamten Produktionszeitraum zu garantieren.

Daher ist ein Verfahren zur Kompensation von thermischen Störeinflüssen notwendige Voraussetzung für den Einsatz von Industrierobotern als Meßsystemträger.

1.3 Zielsetzung

Der vorliegenden Arbeit liegen zwei Zielsetzungen zugrunde. Um der eingangs erwähnten Problematik der Offline-Programmierung zu begegnen, aber auch aus Gründen der Austauschbarkeit von Industrierobotern, beispielsweise nach einem Crash, muß die Positioniergenauigkeit von Industrierobotern drastisch gesteigert werden. Durch eine einmalige, statische Kalibrierung und eine in der Steuerung integrierte Fehlerkompensation sind im gesamten Arbeitsraum des Roboters Genauigkeiten von unter 1 mm anzustreben, so daß die Produktbezeichnung „Positioniergenauer Roboter“ zu Recht getragen werden kann.

Nachdem diese Techniken entwickelt wurden, sollen sie um eine zyklische Kalibration des Roboters erweitert werden, so daß die Robotergenauigkeit möglichst unabhängig von Temperatureinflüssen gehalten werden kann. Gelingt es, das Betriebsverhalten eines Roboters über eine lange Zeit (Monate, Jahre) konstant auf dem Niveau der Wiederholgenauigkeit zu halten, ist der Einsatz von Standard-Industrierobotern in der Flexiblen-Inline-Meßtechnik berechtigt.

1.3.1 Positioniergenauer Roboter

Ausgangspunkt für die Kalibration von Industrierobotern soll die Entwicklung eines frei parametrisierbaren Robotermodells sein. Unter Berücksichtigung der dominierenden Effekte sollen die Genauigkeiten des Roboters im gesamten Arbeitsraum verbessert werden und unabhängig von Nutzlast und Ausladung des Roboters sein. Auf der Basis von Meßdaten müssen hierfür robuste und effiziente numerische Lösungsverfahren zur Bestimmung der unbekannten Modellparameter entwickelt werden.

Auf dem Markt ist eine Reihe von Meßsystemen verfügbar, die sich in der Anzahl der meßbaren Komponenten (6D,3D,1D), in der Größe des Arbeitsvolumens, in der Funktionsweise, in der Komplexität und Handhabung, sowie im Preis teilweise erheblich unterscheiden. Die Eigenschaften der Meßsysteme legen ihr bevorzugtes Einsatzgebiet fest. Einige Systeme sind aufgrund ihrer umständlichen Handhabung nur für den stationären Einsatz in einem Roboterlabor geeignet, zeichnen sich jedoch durch einen großen Arbeitsbereich und hohe Genauigkeiten aus. Andere hingegen sind leicht transportabel und schnell einsetzbar, so daß sie direkt in der Fertigungszelle eingesetzt werden können (In-the-field-Kalibration). Um möglichst viele Anwendungsgebiete abzudecken, sollen Roboterkalibrierverfahren für die verschiedenen Sensorsysteme entwickelt werden. Aus Gründen der industriellen Akzeptanz ist es erforderlich, für einen vollautomatischen Meßablauf zu sorgen. Verfahren zur Kommunikation und Synchronisation von Meß- und Robotersystem müssen hierfür bereitgestellt werden.

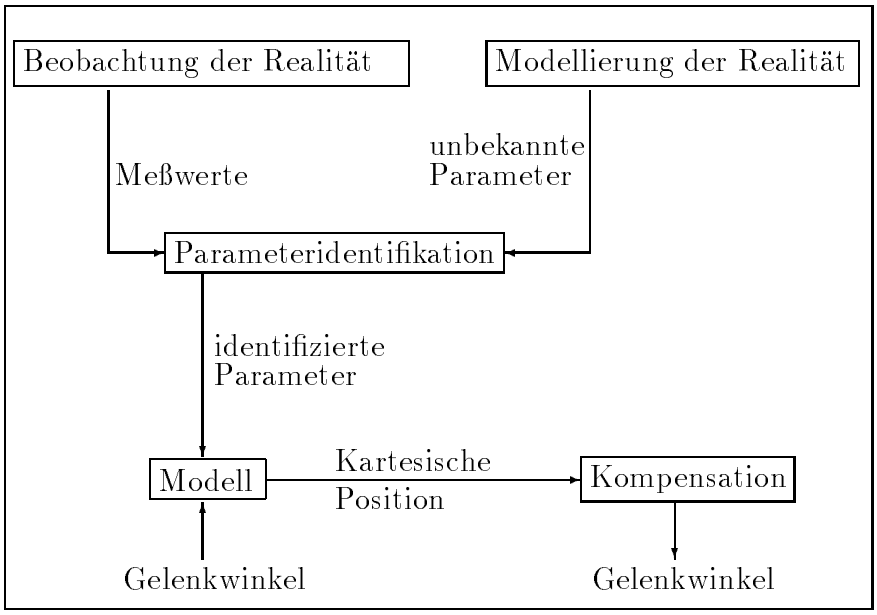


Abbildung 1.2: Modellierung, Identifikation und Kompensation

Steht schließlich ein Robotermodell zur Verfügung, das das Verhalten der realen Roboterstruktur ausreichend genau wiedergibt, muß eine Strategie zur Kompensation der voraussichtlichen kartesischen Fehler gefunden werden. Alle bisher bekannten Kompensationsverfahren basieren auf einer Offline-Korrektur des Roboterprogramms, das heißt, auf der Konvertierung der nominellen Roboterpositionen außerhalb der Steuerung. Neben der Gefahr, daß gewisse Punkte gar nicht oder mehrmals konvertiert werden, ist bei dieser Art der Kompensation die Korrektur von Interpolationspunkten bei Bahnbewegungen nicht möglich. Nur eine in der Robotersteuerung integrierte Echtzeitkompensation aller Zwischen- und Endpunkte garantiert die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Verfahrens.

In Abbildung 1.2 sind die einzelnen Schritte, die zu einer modellbasierten Kalibrierung mit anschließender Fehlerkompensation notwendig sind, allgemein dargestellt.

1.3.2 Wiederholgenauer Roboter

Dadurch, daß das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Modell nur einmal kalibriert wurde und im weiteren konstant bleibt, wird vorausgesetzt, daß sich das Robotersystem in der Zeit nicht mehr ändert. Dies ist allerdings in der Realität aufgrund thermischer Störeinflüsse nicht der Fall. Daher soll im Rahmen der Flexiblen-Inline-Meßtechnik eine Methode zur meßtechnischen Erfassung der Temperaturdrift entwickelt werden. Der optische Sensor, der zur Erfüllung der eigentlichen Meßaufgabe ohnehin vorhanden ist, kann hierfür eingesetzt werden. Die Anwendung eines modifizierten Kalibrationsverfahrens auf die gemessene Drift sollte es ermöglichen, die temperaturbedingte Konfigurationsänderung des Roboters in Form geänderter Modellparameter auszudrücken. Bildet das neu gewonnene Modell die Grundlage für die Kompensation der Fehlereinflüsse, so erhält man einen klassischen Regelkreis, dessen Wirkungsweise in Abbildung 1.3 dargestellt ist.

Die zyklische Erfassung der Temperaturdrift (Istgröße) und die Identifikation der Modellparameter (Regelgröße) hält über die Fehlerkompensation (Rückkopplung) das System

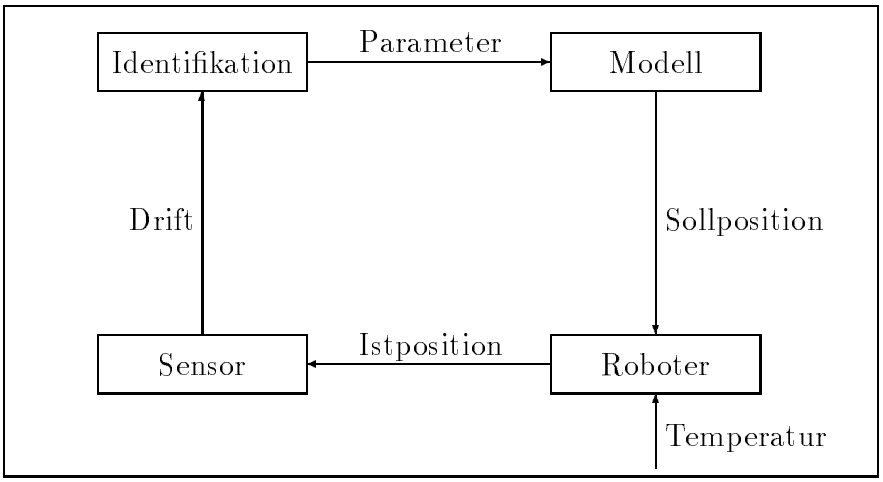


Abbildung 1.3: Regelkreis zur Temperaturkompensation

im Gleichgewichtszustand und wirkt dem instationären Betriebsverhalten entgegen.

Bei der industriellen Umsetzung der Flexiblen-Inline-Meßtechnik müssen typische Beschränkungen berücksichtigt werden. Die wichtigste Beschränkung stellt wohl die zur Verfügung stehende Taktzeit dar. Nur während der Zuführzeit der Bauteile, die meistens weniger als eine Minute beträgt, kann eine Messung der Temperaturdrift stattfinden. Daher sind Konzepte gefragt, die ein sicheres Aufteilen der Meßphase auf mehrere Taktzyklen ermöglichen. Da der Kalibrationsprozeß selbst nicht teilbar ist, muß bereits während der Entwicklung des numerischen Optimierungsverfahrens speziell auf dessen Geschwindigkeit und Effizienz geachtet werden. Eine Kalibrierdauer von einigen Sekunden hätte bereits eine empfindliche Einschränkung der Meßzeit zur Folge. Auch die zuverlässige Konvergenz des verwendeten Verfahrens ist zur Vermeidung von Produktionsausfällen absolute Voraussetzung.

1.4 Gliederung der Arbeit

Der vorliegenden Arbeit liegt der folgende Aufbau zugrunde: In Kapitel 2 wird eine Klassifizierung der vorhandenen Methoden der kinematischen Kalibrierung vorgenommen und der aktuelle Stand der Forschung und Technik dargestellt. In Kapitel 3 wird die kinematische Modellierung vorgestellt und eine Approximation der inversen Kinematik entwickelt. Ein Überblick über die wichtigsten Funktionsprinzipien der Meßtechnik ist in Kapitel 4 zu finden. Die Anzahl der von der Sensorik gemessenen Dimensionen begründet jeweils ein eigenes Kalibrierverfahren, deren Beschreibung in den nächsten drei Kapiteln erfolgt. Die Theorien aus der Funktionalanalysis, die zur Konzeption der 6D-Kalibrierung führten, sowie eine Beschreibung der zugrunde liegenden iterativen Lösungsverfahren sind neben Anwendungsbeispielen und numerischen Resultaten in Kapitel 5 ausgeführt. Die Ursachen für die Entstehung der Temperaturdrift, deren zyklische Kompensation und die Anwendung des Verfahrens als Flexibles-Inline-Meßsystem werden im Rahmen des Kapitels 6 behandelt. Die Länge eines abgespulten Fadens ist die Basis für die 1D-Kalibrierung aus Kapitel 7. Das zugrunde liegende Software-Konzept und die einzelnen Softwareprodukte, die sich aus der Anbindung der unterschiedlichen Sensoren ergeben, werden in Kapitel 8 vorgestellt. Die Arbeit endet mit den Schlußbetrachtungen und einem Ausblick in Kapitel 9.

Kapitel 2

Stand der Forschung

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Ansätze aus Forschung und Technik behandelt. Die von Schröer [20] und Geuens [7] im Rahmen des europäischen IRIS-Projektes (Improvement of Robot Industrial Standardisation) vorgeschlagenen Empfehlungen zur Standardisierung von industrieller Kalibrierung sieht eine Unterteilung in Roboter- und Zellenkalibrierung vor.

Die Aufgabe der Roboterkalibration (Abschnitt 2.2) ist es, die Positioniergenauigkeit des Roboters zu steigern, und zwar unabhängig von dem verwendeten Werkzeug oder sonstigen peripheren Komponenten. Die verschiedenen Methoden zur Kalibrierung kinematischer Ketten wurden von Hollerbach und Wampler [11] 1996 klassifiziert (siehe Abschnitt 2.2.1). Der größte Teil der verwendeten Verfahren basiert auf der Vermessung des Endeffektors durch ein externes, metrisches Meßsystem. In diesen sogenannten Open-Loop-Methoden werden unterschiedliche Posen durch Bewegung aller Roboterachsen erzeugt und die kinematischen Parameter ergeben sich aus einer nichtlinearen Optimierung über die gesamte Menge an Posen. Bei den Closed-Loop-Methoden bildet der Manipulator eine bewegliche, geschlossene kinematische Kette aus, indem der Endeffektor fest mit dem Grund verbunden wird. Auf die Verwendung eines externen Meßsystems kann in diesem Fall verzichtet werden, da die Kalibrierung allein auf der Auswertung der anliegenden Achswinkel basiert.

Die Zellenkalibration (Abschnitt 2.3) beschränkt sich in der Regel darauf, auf der Basis von Meßwerten das ursprüngliche CAD-Modell der tatsächlichen Roboterzelle anzupassen und somit die Übereinstimmung von theoretischem Modell und Realität zu verbessern.

2.2 Roboterkalibration

In Abschnitt 2.2.1 werden die modellbasierten Methoden der Roboterkalibration klassifiziert. Die unbekannten Modellparameter werden in einem einzigen, globalen Identifikationsprozeß bestimmt. Am weitaus häufigsten werden die in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten Open-Loop-Methoden eingesetzt. Auch die vorliegende Arbeit ist in diesen Bereich einzuordnen, so daß einige charakteristische Gemeinsamkeiten und Unterschiede vergangener

Arbeiten auf dem Gebiet der statischen Roboterkalibration herausgearbeitet werden. Da es sich bei der zyklischen Temperaturkompensation um eine wiederholt ausgeführte statische Roboterkalibration handelt, wird in diesem Zusammenhang auch eine Arbeit aus dem noch jungen Forschungsgebiet der Flexiblen-Inline-Meßtechnik diskutiert.

Eine weitere Gruppe von Kalibrationsmethoden stellt die Einzelachskalibration (Abschnitt 2.2.2) dar. Durch Messung der Kreisbahnen, die der Endeffektor durch die Bewegung jeweils einzelner Roboterachsen beschreibt, und einer anschließenden Analyse können die kinematischen Parameter berechnet werden.

Bei dem Verfahren der numerischen Kalibration aus Abschnitt 2.2.3 werden die kartesischen Roboterfehler systematisch erfaßt und in einer Nachschlagetabelle gespeichert. Eine Auswertung der Tabelleneinträge ermöglicht dann die Fehlerkompensation während des Roboterbetriebs.

Der Abschnitt 2.2.5 über die dynamische Roboterkalibration basiert auf Empfehlungen von Geuens [7] und liefert Vorschläge, auf welche Weise ein Modell zur Erfassung dynamischer Einflüsse gewonnen werden kann.

2.2.1 Klassifizierung

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Methoden der kinematischen Kalibrierung klassifiziert. Sie unterscheiden sich in der Verwendung eines externen Meßsystems (Open-Loop-Methode) und der passiven Beschränkung des Endeffektors (Closed-Loop-Methode).

Open-Loop-Methoden

Bei der Kalibrierung nach der Open-Loop-Methode wird der Manipulator in einer Reihe von Stellungen positioniert und die zugehörige Position und Orientierung des Endeffektors ganz oder teilweise durch ein externes Meßsystem erfaßt. Der Ausdruck „Open-Loop“ rührt daher, daß der Endeffektor frei im Raum positionierbar ist.

Die Bestimmungsgleichungen für die unbekannten kinematischen Parameter λ entstehen durch Anwendung der verschiedenen Posen ϑ_i auf die Vorwärtskinematik f des Manipulators:

$$x_i = f(\vartheta_i, \lambda) = f_i(\lambda) \quad , \tag{2.1}$$

wobei x_i der 6-dimensionale Vektor ist, der jeweils Position und Orientierung des Endeffektors enthält. Die Anzahl der gemessenen Komponenten muß nicht notwendigerweise 6 betragen, sondern kann bei einer partiellen Posenmessung auch kleiner sein.

Closed-Loop-Methoden

Der Nachteil der Open-Loop-Methode ist, daß ein externes Meßsystem benötigt wird. Daher wurde vor einigen Jahren alternativ die Closed-Loop-Methode vorgeschlagen (Bennett und Hollerbach [3], 1991). Bei diesem Verfahren wird der Endeffektor so mit der Umgebung des Roboters fixiert, daß eine bewegliche, geschlossene kinematische Kette entsteht. Neben der Kenntnis einer Referenzstrecke benötigt man für die Kalibrierung

lediglich die anliegenden Achswinkel ϑ_i, die von einem internen Wegemeßsystem geliefert werden. Wie zuvor entstehen die Bestimmungsgleichungen für den Parametervektor λ aus der Vorwärtskinematik des Manipulators. Der Ursprung der kinematischen Kette kann hierbei in den Endpunkt gelegt werden, so daß die kinematischen Gleichungen von der Gestalt

$$0 = f(\vartheta_i, \lambda) = f_i(\lambda) \tag{2.2}$$

sind.

Trotz des Vorteils, auf den Einsatz eines externen Meßsystems verzichten zu können, kommt das Closed-Loop-Verfahren relativ selten zur Anwendung, da die Messungen nicht kontaktlos erfolgen. Durch die Fixierung des Endpunktes mit der Umgebung ist eine Beeinflußung der kinematischen Struktur durch extern auftretende Kräfte prinzipiell nicht auszuschließen.

Äquivalenz von Open- und Closed-Loop-Methode

Im Falle der Open-Loop-Methode können die Messungen x_i, die das externe Meßsystem vom Endpunkt macht, als zusätzliche Verbindungselemente zwischen Endeffektor und dem festen Standpunkt des Meßsystems aufgefaßt werden. Dies bedeutet, daß die offene kinematische Kette mit Hilfe des Meßsystems geschlossen werden kann. Gleichung (2.1) läßt sich somit als

$$0 = f_i(\lambda) - x_i = f_i'(\lambda) \tag{2.3}$$

schreiben, wobei die externen Messungen x_i als konstant behandelt werden. Die entstandenen Gleichungen haben nun dieselbe Form wie die Closed-Loop-Gleichungen (2.2).

Nachdem die Äquivalenz beider Methoden gezeigt wurde, ist die entscheidende Frage nicht mehr, welche der beiden Methoden verwendet wird, sondern wie viele „gemessene“ Komponenten (sensed joints) die kinematische Kette enthält, beziehungsweise wie vielen Beschränkungen die Komponenten (constrained joints) unterliegen.

Beispielsweise ist die Open-Loop-Kalibration mittels vollständiger 6-dimensionaler Messung der Posen äquivalent zur Closed-Loop-Kalibration eines vollständig beschränkten Endeffektors. Allerdings ist zu beachten, daß es sich hierbei um einen redundanten Manipulator mit mindestens sieben Freiheitsgraden handeln muß, damit trotz des fest fixierten Endeffektors die Beweglichkeit der kinematischen Struktur gewährleistet ist.

Das Closed-Loop-Äquivalent zur 3-dimensonalen Punktmessung des Endeffektors ist die Methode des Punktkontaktes. Hier wird ein ausgezeichneter Punkt am Endeffektor in Kontakt zu einem bestimmten Punkt der Umgebung gebracht, indem der Endeffektor verschiedene Orientierungen annimmt.

2.2.2 Einzelachskalibration

Das Verfahren der Einzelachskalibration unterscheidet sich prinzipiell von den zuvor vorgestellten Loop-Methoden. Jedes Achsverbindungselement wird einzeln vermessen, indem es als Linie im Raum interpretiert wird. Hierzu werden die einzelnen Achsen nacheinander bewegt, so daß der Endeffektor jeweils eine Kreisbahn beschreibt. Positionsmessungen des Endeffektors definieren somit Punkte auf einer Kreisbahn. Das

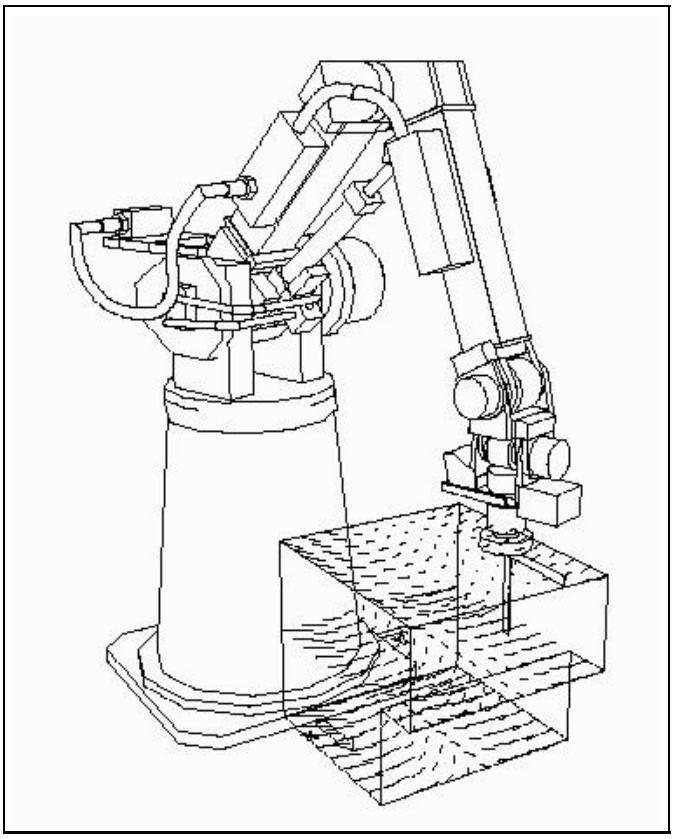


Abbildung 2.1: Numerische Kalibrierung

Achsverbindungselement wird dann über die Normale der Kreisebene und den Kreismittelpunkt festgelegt.

Der Nachteil der Methode besteht darin, daß während der Messung einer Achse garantiert werden muß, daß alle anderen Achsen tatsächlich stationär sind. Außerdem können mit dieser Methode lediglich geometrische Abweichungen erfaßt werden.

2.2.3 Numerische Kalibration

Abbildung 2.1 veranschaulicht das Prinzip der numerischen Kalibration. Zunächst wird der 3-dimensionale Raum in eine Gitterstruktur zerlegt. Anschließend wird der Roboter so programmiert, daß er sämtliche Gitterpunkte der Diskretisierung anfährt. In jedem Punkt wird eine Messung des Endeffektors vorgenommen und die Differenz zwischen programmierter und tatsächlich erreichter Pose in einer Tabelle abgespeichert. Auf diese Weise entsteht ein Vektorfeld, das Voraussagen über die zu erwartenden kartesischen Fehler liefert. Die Fehler von Zwischenpunkten werden aus den Fehlervektoren der benachbarten Gitterpunkte durch Interpolation gewonnen. Die Kompensation der kartesischen Fehler erfolgt anschließend durch Überlagerung der programmierten Posen mit den vorausgesagten Fehlervektoren.

Es liegt auf der Hand, daß diese Methode eine ausgedehnte Meßphase erfordert. Es ist nahezu unmöglich, den kompletten 3-dimensionalen Arbeitsraum eines Roboters durch ein ausreichend feines Gitter zu diskretisieren. Außerdem kann jeder Punkt mit unendlich vielen Orientierungen und unter verschiedenen Konfigurationen erreicht werden.

Jeder Punkt sollte auch unter Anbringung unterschiedlicher Nutzlasten gemessen werden, um der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur Rechnung zu tragen. Werden all diese Anforderungen berücksichtigt, ist es durchaus vorstellbar, gute Voraussagen über die Roboterfehler für beliebige Lasten und Orientierungen zu treffen.

In der Praxis eignet sich dieses Verfahren allerdings nur für lokale Kalibrierungen in einem beschränkten Arbeitsraum, bei eingeschränkter Variation der Orientierung und definierter Nutzlast. Der große Vorteil dieser Methode ist in der Tat, daß sämtliche Fehler, unabhängig von ihrem Ursprung, erfaßt und kompensiert werden können, und dies ohne den Aufwand der Modellbildung und Parameteridentifikation.

2.2.4 Statische Kalibration

Die statische Roboterkalibrierung hat zum Ziel, durch eine modellbasierte Kalibration die stationäre Positioniergenauigkeit eines Roboters zu erhöhen. Mittels eines globalen Optimierungsverfahrens lassen sich die meisten Roboterfehler durch einen einzigen Identifikationsprozeß bestimmen. Hierzu wird der Roboter in einer Reihe von programmierten Posen von einem externen, metrischen Meßsystem vermessen und die Abweichungen von nomineller und tatsächlicher Pose werden einem Identifikationsprozeß zugeführt. Das Ergebnis der Identifikation ist ein verbessertes Robotermodell, das die Kinematik des identifizierten Roboters genauer wiedergibt.

Die statische Kalibration von Industrierobotern ist bereits seit vielen Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Eine der umfassendsten Untersuchungen stammt von Schröer [19] aus dem Jahre 1993. Praktische Versuche mit dem weitverbreiteten Typ des 6-Gelenk-Roboters ergaben, welche Parameter hauptsächlich für das schlechte Positionierverhalten eines derartigen Roboters verantwortlich sind. Dies sind vor allem die geometrisch-kinematischen Fehler, wie Längenabweichungen, Winkel- und Nullagenfehler, sowie die elastischen Effekte der Getriebenachgiebigkeiten. Getriebeungleichförmigkeiten, Getriebespiel, Kopplung der Antriebselemente und Elastizitäten der Strukturelemente können dagegen weitgehend vernachlässigt werden. Neben Autoren, die auf die Modellierung von Elastizitäten ganz verzichten (vgl. [18]), werden ansonsten die Nachgiebigkeiten nur in Richtung der jeweiligen Gelenkbewegung betrachtet. Verformungen von vermeintlich starren Anordnungen (z.B. Achse 1, Achse 6) bleiben hierbei unberücksichtigt.

Zur Darstellung der grundlegenden kinematischen Transformation, bestehend aus Rotation und Translation, verwenden die meisten Autoren (vgl. u.a. [19], [18], [8]) eine Mischform aus der Danavit-Hartenberg- und der Hayati-Mirmirani-Konvention. Bei der Erstgenannten handelt es sich um eine weitverbreitete 4-parametrige Darstellungsform, die sich besonders gut zur Beschreibung von senkrecht aufeinanderfolgenden Gelenken eignet. Allerdings weist sie bei annähernd parallelen Achsen eine Singularität auf, so daß man in diesen Fällen — zur Vermeidung numerischer Schwierigkeiten — meist auf die 5-parametrige Hayati-Mirmirani-Darstellung zur Beschreibung paralleler Achsen ausweicht. Der Grund für die Wahl dieser Darstellungsformen liegt darin, daß sich durch die minimale Anzahl von Parametern beim numerischen Identifikationsprozeß Redundanzen vermeiden lassen. Außerdem basieren viele Steuerungsmodelle auf dieser kinematischen Beschreibung, so daß eine Kompensation von geometrischen Abweichungen (und nur dieser) durch eine Modifikation der nominellen kinematischen Parameter erfolgen kann. Der

Preis hierfür ist allerdings eine eingeschränkte Mächtigkeit der Modellierung. Nicht alle möglichen geometrischen Fehlerquellen lassen sich durch 4 bzw. 5 Parameter erfassen.

Die Positionsabweichungen eines Roboters setzen sich aus Positionierungs- und Orientierungsfehlern zusammen. Verstärkt durch die Länge des benutzten Werkzeuges wirken sich Fehler in der Orientierung ebenfalls als Positionsabweichungen am Endeffektor aus. Um hohe Genauigkeiten für verschieden Werkzeuglängen zu erreichen, ist eine Berücksichtigung der Orientierungsfehler notwendig. Trotzdem verwenden viele Autoren zur Kalibrierung von Industrierobotern nur 3-dimensionale Meßverfahren, die eine Messung der Orientierung nur indirekt zulassen, indem durch einen gewissen Abstand des Meßmerkmals von der letzte Roboterachse (Flansch) die Orientierungsfehler implizit eingehen. Um diesen Nachteil wieder auszugleichen, werden allerdings doppelt so viele Roboterpositionen für das Parameteridentifikationsverfahren benötigt, was zu einer deutlichen Ausweitung der Meßzeiten führt.

Um den unvermeidlichen Meßfehlern Rechnung zu tragen, ist es vorteilhaft, fehlerausgleichende Verfahren und damit mehr als die minimal erforderliche Anzahl von Meßdaten zu verwenden. Darin stimmen alle Autoren überein, die numerische Lösungsverfahren vorschlagen. Da nach Schröer ([19], S. 193ff) das entstehende nichtlineare Ausgleichsproblem nur eine schwache Nichtlinearität aufweist, kann zu dessen Lösung ein Gauß-Newton-Verfahren herangezogen werden, das zur Sicherheit mit einem einfachen Line-Search-Verfahren kombiniert wird. Damit wird eine Verkleinerung der Residuen durch eine fortgesetzte Halbierung der Schrittweite in Suchrichtung garantiert. Die Anwendung des aufwendigen Levenberg-Marquardt-Verfahrens, wie es manche Autoren vorschlagen (vgl. [18]), ist zur Lösung des Problems nicht angebracht.

Da ein direkter Zugriff auf die internen Transformationen einer realen Robotersteuerung in der Regel nicht möglich ist, schlagen sämtliche Autoren zur Kompensation der kinematischen Fehler entweder eine Modifikation der Standard-Transformationsparameter vor, und nehmen damit eine drastische Einschränkung der modellierbaren Effekte in Kauf, oder sie empfehlen die fehleranfällige Offline-Korrektur der Roboterprogramme.

Von Gräser wurde 1999 ein Verfahren zur zyklischen Temperaturkompensation von Knickarmrobotern mit 6 rotatorischen Achsen entwickelt. Die Temperaturdrift des Roboters wird hierbei an Referenzkörpern in Gestalt von Meßwürfeln, die über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilt sind, meßtechnisch erfaßt. Die 3-dimensionalen Driftvektoren stellen die Eingangsgrößen für die nichtlineare Optimierung der Standard-Vorwärtskinematik des verwendeten Roboters dar. Die Modellierung enthält 9 Freiheitsgrade, wobei 6 auf Längenabweichungen von Strukturelementen und 3 auf die Winkeländerungen der Grundachsen entfallen. Der von Gräser entwickelte Algorithmus weist jedoch eine Besonderheit auf (vgl. [8], S. 131): Die Parameteridentifikation wird mit neuen, größeren Startwerten für die Winkeländerungen wiederholt, falls sich die identifizierten Längen bezüglich des letzten Iterationsschrittes zu stark ändern oder sie eine konstante Schranke überschreiten. Offenbar besitzt der Algorithmus die Tendenz, die Temperaturdrift vor allem durch Änderungen der Strukturlängen auszugleichen. Die Tatsache, daß eine Änderung der Startwerte zu anderen Berechnungsergebnissen führt, legt den Schluß nahe, daß das verwendete numerische Optimierungsverfahren keine Ergebnisse im Sinne einer globalen Minimierung liefert. Dennoch ist es in einem praktischen Versuch gelungen, eine Temperaturdrift von durchschnittlich 0.8 mm auf ca. 0.25 mm zu reduzieren.

2.2.5 Dynamische Kalibration

Diese Art der Kalibrierung umfaßt sämtliche dynamischen Effekte, die während der Bewegung eines Roboters auftreten. Um diese vorherzusagen und zu kompensieren, müssen zunächst die Trägheiten der einzelnen Roboterkomponenten und aller extern aufgebrachter Massen identifiziert werden. Ein passendes dynamisches Modell zur Beschreibung von Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung der einzelnen Roboterkomponenten und des Endeffektors muß aufgestellt und identifiziert werden, wofür dynamische Messungen der Robotertrajektorien benötigt werden.

Dies sollte ausreichen, um Phänomene, wie Stabilisierung von Posen, Überfahren des Zielpunktes, Vibrationen, Bahn-, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitstreue ausreichend genau zu beschreiben.

Für die Herleitung eines korrekten dynamischen Modells und der Quantifizierung von Trägheitseigenschaften können eine Strukturanalyse und eine kombinierte Messung von antriebsseitigem Drehmoment und abtriebsseitiger Beschleunigung von Nutzen sein.

2.3 Zellenkalibration

Die Zellenkalibration strebt eine Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit an, indem Abmessungen und Lage sämtlicher Objekte, die an der Roboteraufgabe beteiligt sind, durch Kalibration genauer bestimmt werden.

Hierzu zählen die exakten Abmessungen des Roboterwerkzeugs (Abschnitt 2.3.1), die Standorte aller in der Umgebung des Roboters lokalisierten Objekte (Abschnitt 2.3.2), die Geometrie des zu bearbeitenden Bauteils (Abschnitt 2.3.3) sowie der Bearbeitungsprozeß selbst (Abschnitt 2.3.4).

2.3.1 Werkzeug

Für die meisten Roboteranwendungen wird ein spezielles Werkzeug am Roboterflansch angebracht (Schweißzange, Greifer). Bestimmte Teile oder Punkte des Werkzeuges (die Elektrode einer Schweißzange, die Finger eines Greifers) treten in Kontakt mit Objekten der Umgebung. Daher ist nicht nur die genaue Position und Orientierung des Roboterflanschs von Bedeutung, sondern auch die Beziehung der interagierenden Teile oder Punkte des Werkzeugs bezüglich des Roboterflanschs. Das Ziel der Werkzeugkalibrierung ist es, das sogenannte Toolframe anzugeben, das die exakte Position und Orientierung der interagierenden Teile bezüglich des Flanschkoordinatensystems beschreibt (siehe Abbildung 1.1). Den Roboter zu bewegen, bedeutet dann, das Toolframe in Übereinstimmung mit den programmierten Posen zu bringen.

Zur Durchführung der Werkzeugkalibrierung benötigt man entweder ein externes Meßsystem oder der Roboter selbst wird als Meßmittel eingesetzt.

Um den Ursprung des Toolframes zu bestimmen, wird der Roboter so bewegt, daß das Werkzeug um diesen Punkt rotiert. In der Praxis benutzt man dafür einen spitzen Gegenstand, der in der Umgebung fixiert ist, und bringt den Ursprung des Werkzeuges in Kontakt mit dieser Spitze. Dieser Vorgang wird einige Male mit unterschiedlichen Orientierungen wiederholt. Aus den kartesischen Positionen des Roboterflanschs kann nun der

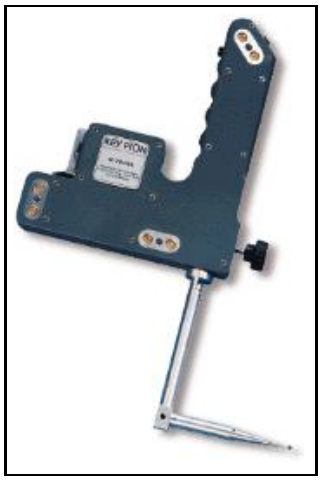


Abbildung 2.2: Optischer 6D-Meßtaster

Ursprung des Toolframes abgeleitet werden. Zur Identifikation der Werkzeugkoordinatenachsen muß der Roboter entlang zweier Achsen des Werkzeugs bewegt werden. Über eine Menge von Punkten entlang jeder Richtung kann dann das Toolframe bezüglich des Flanschkoordinatensystems bestimmt werden.

Der größte Nachteil dieser Methode besteht darin, daß der Roboter zur Aufzeichnung der Punkte im kartesischen Raum benutzt wird. Die Genauigkeit, mit der das Toolframe ermittelt werden kann, ist somit von derselben Größenordnung wie die Positioniergenauigkeit des Roboters. Eine vorherige Kalibrierung des Roboters ist daher ratsam und führt in der Tat zu einer signifikanten Verbesserung der Werkzeugkalibrierung. Ein weiterer Nachteil ist, neben dem Bedarf der externen Referenzen (ein Punkt und zwei orthogonale Linien), deren visuelle Antastung.

Die Messung des Toolframes mit Hilfe eines externen Meßsystems findet in zwei Schritten statt. Zunächst mißt man sich über physikalische Merkmale, wie Adapterplatten oder Zentrierbolzen, in das Flanschkoordinatensystem ein. Sobald dieser Bezug hergestellt ist, können alle Messungen bezüglich des Flanschkoordinatensystems dargestellt werden.

Ähnlich wie im ersten Schritt, wird das eigentliche Toolframe durch die Vermessung einfacher geometrischer Grundkörper, wie Flächen, Quader oder Kugeln, gewonnen. Hierbei legen Benutzer definierte Konventionen fest, wie das Werkzeugkoordinatensystem zu diesen Körpern liegt. Zum Beispiel befindet sich der Koordinatenursprung einer Punktschweißzange im Zentrum der fixierten Elektrode und die positive Z-Achse zeigt von der fixierten in Richtung der beweglichen Elektrode.

Das Verfahren der Werkzeugbestimmung kann sowohl mit einer Koordinatenmeßmaschine (CMM), als auch mit einem optischen System durchgeführt werden. In beiden Fällen erfolgt die Antastung der Merkmale über einen Meßtaster. In Abbildung 2.2 ist ein optischer 6D-Handtaster der Firma Krypton dargestellt, dessen LEDs von einem Kamerasystem registriert werden.

2.3.2 Umgebung

Die Kalibrierung der Umgebung zielt darauf ab, die Standpunkte des Roboters und aller Objekte der Zelle, die Teil der Roboterapplikation sind, zu bestimmen. Ein Modell der

Arbeitszelle wird angefertigt, wobei die Beziehungen der einzelnen Objekte relativ zu einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem definiert sind. Meistens handelt es sich bei diesem Modell um ein CAD-Modell, das offline erstellt wurde, und das das nominelle Zellenlayout repräsentiert. Kalibrierung der Umgebung wird nun angewendet, um dieses Modell zu verbessern, so daß es das reale Layout genauer wiedergibt. Bei der Kalibrierung der Umgebung geht es, im Gegensatz zur Kalibrierung des Bauteils, nicht darum, die präzise Geometrie der Objekte zu erfassen, sondern ausschließlich darum, deren exakten Standpunkt zu bestimmen.

Die Kalibrierung der Umgebung ist der Werkzeugkalibrierung sehr ähnlich. Zunächst wird ein Referenzkoordinatensystem festgelegt, das sogenannte Weltkoordinatensystem. Hierbei kann es sich sowohl um das Roboterbasissystem handeln, als auch um ein beliebiges anderes System, das durch ein Objekt oder eine Gruppe von Objekten definiert wird. Wie zuvor kann der Roboter als Meßmittel eingesetzt werden, oder es wird ein externes, metrisches System verwendet.

Bei Verwendung des Roboters als Koordinatenmeßmaschine wird ein kalibriertes Tastwerkzeug am Roboter angebracht. Aus den Koordinaten von angetasteten Punkten läßt sich dann die Transformation vom untersuchten Objekt in das Roboterbasissystem extrahieren. Wie bei der Werkzeugkalibration bereits bemerkt wurde, gehen auch hier die Roboterfehler in die erzielbaren Genauigkeiten ein.

Wird ein externes Meßsystem benutzt, sind zwei Schritte erforderlich:

1. Identifikation der Roboterbasis bezüglich des Meßsystems: Durch Antasten physikalischer Merkmale auf der Grundplatte, die zur Befestigung des Roboters dient, kann die Roboterbasis gewonnen werden. Ist dies nicht mehr möglich, da der Roboter bereits montiert wurde, kann dieser Schritt auch durch einen Abgleich von Sensorkoordinaten (gemessene Posen) und Roboterkoordinaten (programmierte Posen) bewerkstelligt werden.

2. Identifikation der Objektpositionen bezüglich des Meßsystems: Durch Punktmessungen am Objekt wird die gewünschte Transformation in das Koordinatensystem des Meßsystems gewonnen.

Eine anschließende Multiplikation der beiden ermittelten Frames liefert den gewünschten Bezug zwischen Objekt und Roboterbasis. Zu Beachten bleibt lediglich, daß während der gesamten Prozedur das Meßsystem nicht bewegt werden darf, anderenfalls müssen beide Schritte wiederholt werden.

2.3.3 Bauteil

Unter der Kalibration eines Bauteils versteht man die Bestimmung seiner Objektgeometrie. Meßbare Merkmale, wie Löcher, Kanten, Ecken oder Flächen werden in Bezug zum Koordinatensystem des Werkstückes gebracht. Die Kalibration beantwortet die Frage, ob ein Werkstück mit seinem offline erzeugten CAD-Modell übereinstimmt und kann gegebenenfalls zu seiner Korrektur (Reverse Engineering) herangezogen werden.

Betrachtet man beispielsweise eine Schweißapplikation, erscheint es oftmals sinnvoller, die Schweißpunkte direkt auf dem Bauteil zu messen und im Bauteilkoordinatensystem

auszudrücken. Durch die Kenntnis der Transformation vom Bauteil in die Roboterbasis erhält man dadurch direkt die korrekten Roboterposen, die das Toolframe zu den Schweißpunkten führen. Eine Verschiebung des Bauteils zieht eine geänderte Transformation nach sich und somit eine automatische Nachführung der Roboterposen.

In diesem Zusammenhang kann auch das Teach-In-Verfahren mit dem Roboter als geometrische Kalibrierung des Werkstückes gesehen werden, wobei der Roboter als Meßmittel zur Erfassung der Applikationspunkte dient.

2.3.4 Prozeß

Für einen erfolgreichen Einsatz von Robotern ist nicht nur die perfekte Erfüllung der Roboteraufgabe von Bedeutung, sondern auch die optimale Einstellung der Prozeßparameter. Zum Beispiel hängt die Qualität, mit der eine Lackieraufgabe ausgeführt wird, von der Form des Sprühkegels, der Distanz zur Oberfläche, der Zusammensetzung des Lackes, sowie vom Luftdruck ab.

Insgesamt wird die Kalibration des Prozesses von sämtlichen Prozeßkomponenten beeinflußt und sollte daher auch Bestandteil der Zellenkalibration sein. Etliche Prozeßtechnologien sind heutzutage bereits in OLP-Systemen integriert, so daß die Kalibration im wesentlichen der Frage nachgeht, in wieweit die Prozeßsimulation mit der Realität übereinstimmt.

Kapitel 3

Kinematische Modellierung

3.1 Einleitung

Ziel dieses Kapitels ist es, ein parametrisierbares Modell auf der Basis des mechanischen Aufbaus von Industrierobotern aufzustellen, dessen Parameter im Zuge eines Kalibrierungsprozesses identifiziert werden.

Der mechanische Aufbau von Industrierobotern ist in der Regel in Form einer offenen kinematischen Kette ausgeführt. Ausgehend von einem Grundgestell wird eine solche Struktur durch die Anordnung von Bewegungsachsen (Gelenke) und Achsverbindungselementen (Links) gekennzeichnet. Entsprechend der Anordnungsart der Elemente können Industrieroboter in serielle, parallele oder hybride Strukturen unterteilt werden. Die mathematische Modellierung der Kinematik beschreibt das stationäre Bewegungsverhalten des Industrieroboters ohne Berücksichtigung der auslösenden Kräfte. In der Regel wird hierfür ein starres Mehrkörpersystem mit Kettenstruktur verwendet (Abschnitt 3.3). Jedem Gelenk der kinematischen Kette wird ein eigenes, körperfestes Koordinatensystem zugeordnet. Die Transformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koordinatensystemen wird durch ein sogenanntes Frame beschrieben.

Die am weitesten verbreitete kinematische Darstellungsform ist die Denavit-Hartenberg-Konvention (DH). Sie benötigt nur 4 Parameter zur Darstellung eines Frames, indem die Verschiebung und Verdrehung um die y-Achse unberücksichtigt bleiben. Dadurch werden jedoch die Variationsmöglichkeiten in der Anordnung der Koordinatensysteme eingeschränkt. Zudem besitzt diese Darstellungsform eine Singularität bei annähernd parallelen, aufeinanderfolgenden Gelenkachsen. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit das vollständige 6-dimensionale Parametermodell zur Beschreibung von Frames gewählt (Abschnitt 3.2). Hier befinden sich die Freiheitsgrade an den Stellen, an denen sie auch in der Realität lokalisiert sind und Singularitäten treten nur bei bestimmten Achskonstellationen auf und stellen daher Ausnahmen dar.

Das idealisierte kinematische Modell beschreibt allerdings nicht exakt das Verhalten eines realen Roboters. Eine Erweiterung des Modells um physikalische, phänomenologische Eigenschaften der realen Roboterkinematik ist Voraussetzung für eine verbesserte Vorhersage des stationären Positionierverhaltens. Die Abweichungen von der nominellen Kinematik lassen sich in zwei Bereiche unterteilen. Die geometrischen Abweichungen (Abschnitt 3.4), die von Produktions- und Fertigungstoleranzen verursacht werden, und

die nicht geometrischen Abweichungen (Abschnitt 3.5), die hauptsächlich in der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur begründet sind.

Durch den modellbasierten Ansatz läßt sich das kinematische Verhalten des Roboters, unabhängig von Ausladung und Nutzlast, im gesamten Arbeitsraum präzise beschreiben. Die Kompensation der kinematischen Fehler soll direkt in der Robotersteuerung erfolgen. In Abschnitt 3.6 wird mittels eines Korrekturansatzes eine gute Approximation der inversen Kinematik entwickelt, deren Auswertung in Echtzeit eine Offline-Korrektur bestehender Produktionsprogramme überflüssig macht.

3.2 Mathematische Grundlagen

Zentrale Bedeutung bei der Beschreibung des stationären Roboterverhaltens kommen den längen- und winkelerhaltenden Abbildungen (Frames) zu. Anders als in der Literatur üblich (siehe [4]) werden diese Frames nicht als homogene Transformationen, sondern als Tupel, bestehend aus Position und Orientierung, definiert.

Um Mißverständnissen in der Schreibweise vorzubeugen, werden zunächst die Begriffe Position und Orientierung eingeführt. Anschließend wird mit diesen die orthonormale Transformation als Abbildung auf dem $\mathbb{R}^3$ definiert.

Der letzte Teil in diesem Abschnitt befaßt sich mit den Erzeugenden einer Rotationsmatrix, den sogenannten Drehwinkeln. Außerdem werden die partiellen Differentiale aufgestellt, die für das numerische Lösungsverfahren von Bedeutung sind.

3.2.1 Orthonormale Transformation

Position

Bezüglich eines Koordinatensystems A kann jeder beliebige Punkt p im Universum als ein 3×1 Positionsvektor dargestellt werden. Da innerhalb dieser Arbeit viele verschiedene Koordinatensysteme auftreten, muß jedem Punkt die Information mitgegeben werden, bezüglich welches Koordinatensystems er definiert ist. Dies geschieht mittels eines vorangestellten Index.

$$^{A}p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Die Komponenten von ^{A}p stellen die Längen der senkrechten Projektionen auf die entsprechenden Koordinatenachsen von A dar.

Orientierung

Neben der Position eines Punktes im Raum, ist es oftmals notwendig, dessen Orientierung im Raum zu beschreiben. Die geschieht dadurch, daß der Punkt mit einem zusätzlichen Koordinatensystem versehen und dessen Orientierung bezüglich eines Referenzkoordinatensystems angegeben wird.

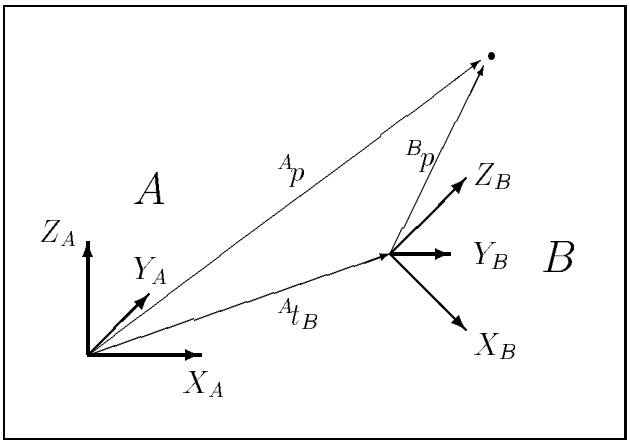


Abbildung 3.1: orthonormale Transformation eines Vektors

Zu einem Koordinatensystem B bezeichnen $\hat{X}_B, \hat{Y}_B, \hat{Z}_B$ die Einheitsvektoren. Bezüglich eines Koordinatensystems A lassen sich diese Einheitsvektoren als ${}^A\hat{X}_B$, ${}^A\hat{Y}_B$, ${}^A\hat{Z}_B$ schreiben. Eine 3×3-Matrix, bestehend aus diesen drei Einheitsvektoren als Spaltenvektoren, heißt Rotationsmatrix. Sie wird mit ${}^A_BR$ bezeichnet und beschreibt B relativ zu A.

$$ {}^A_BR = \begin{pmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \tag{3.1} $$

Frame

Um ein Koordinatensystem B bezüglich eines Koordinatensystems A vollständig zu beschreiben, werden die Position des Ursprungs ${}^At_B$ von B bzgl. A und die Orientierung ${}^A_BR$ von B bzgl. A benötigt. Das Tupel aus Rotationsmatrix und Positionsvektor

$$ {}^A_BT = ({}^A_BR, {}^At_B) \tag{3.2} $$

heißt Frame und beschreibt die Lage und Orientierung des Koordinatensystems B relativ zu dem Referenzkoordinatensystem A.

Orthonormale Transformation

Oftmals ist ein Punkt bezüglich eines Koordinatensystems B gegeben, soll aber bezüglich eines Koordinatensytems A dargestellt werden (siehe Abb. 3.1). Diese Transformation erreicht man dadurch, daß man ${}^Bp$ zunächst in einem Zwischensystem darstellt, das wie B orientiert ist, aber denselben Ursprung wie A hat, und anschließend zu diesem den Vektor ${}^At_B$ addiert.

$$ {}^Ap = {}^A_BR\,{}^Bp + {}^At_B \tag{3.3} $$

Allgemein kann man die Transformation (3.3), die einen Punkt in der Darstellung eines Koordinatensystems in die Darstellung eines zweiten Koordinatensystems transformiert, schreiben als:

$$ {}^Ap = {}^A_BT\,{}^Bp $$

Aus (3.3) und der Tatsache, daß ${}^A_BR^{-1} = {}^A_BR^T$ ist, ergibt sich die inverse Abbildung der Transformation ${}^A_BT$ zu:

$$ {}^A_BT^{-1}\,{}^Ap = {}^A_BR^T\,({}^Ap - {}^Al_B) \tag{3.4} $$

3.2.2 Die Winkel roll, pitch und yaw

Neben der Konstruktion einer Rotationsmatrix durch orthonormale Spaltenvektoren (3.1) gibt es noch weitere Methoden zu deren Erzeugung. So können in dem Buch von John J. Craig [4] Konstruktionen mittels Z-Y-X-Euler-Winkel, Z-Y-Z-Euler-Winkel und mittels Drehung um eine Drehachse nachgelesen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird allein die Erzeugung einer Rotationsmatrix durch die sogenannten Winkel roll, pitch, yaw verwendet. Ursprünglich kommen diese Bezeichnungen aus der Seefahrt und bedeuten schlingern, stampfen und gieren.

Um die Orientierung eines Frames B bezüglich eines Frames A zu beschreiben, wird folgendermaßen vorgegangen:

> Ausgehend von einem festen Referenzframe A wird B um X_A um den Winkel γ (roll) gedreht, dann um Y_A um den Winkel β (pitch) und zuletzt wird B um Z_A um den Winkel α (yaw) gedreht.

Da die Drehachsen während aller Drehungen fixiert bleiben, ergibt sich die resultierende Rotationsmatrix ${}^A_BR$ als Produkt der drei Elementarmatrizen:

$$ \begin{aligned} {}^A_BR(\gamma,\beta,\alpha) &:= ROT({}^AZ_A,\alpha)\quad ROT({}^AY_A,\beta)\quad ROT({}^AX_A,\gamma) \\ &= \begin{pmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{pmatrix}. \end{aligned} \tag{3.5} $$

Hierbei sind mit $c\alpha$ bzw. $s\alpha$ die Kurzbezeichnungen von $\cos\alpha$ bzw. $\sin\alpha$ gemeint. Zu beachten bleibt weiterhin, daß die Reihenfolge des Produkts (von rechts) zuerst roll, dann pitch und schließlich yaw ist. Ausmultipliziert liefert (3.5)

$$ {}^A_BR(\gamma,\beta,\alpha) = \begin{pmatrix} c\alpha\,c\beta & c\alpha\,s\beta\,s\gamma - s\alpha\,c\gamma & c\alpha\,s\beta\,c\gamma + s\alpha\,s\gamma \\ s\alpha\,c\beta & s\alpha\,s\beta\,s\gamma + c\alpha\,c\gamma & s\alpha\,s\beta\,c\gamma - c\alpha\,s\gamma \\ -s\beta & c\beta\,s\gamma & c\beta\,c\gamma \end{pmatrix}. \tag{3.6} $$

Manchmal ist auch das inverse Problem von Interesse, nämlich die Winkel roll, pitch und yaw aus einer gegebenen Rotationsmatrix zu bestimmen. Die Lösung dieses Problems wird hier bezüglich der Darstellung (3.1) für $c\beta \neq 0$ angegeben:

$$ \begin{aligned} \gamma &= \operatorname{atan2}(r_{32}, r_{33}), \\ \beta &= \operatorname{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}), \\ \alpha &= \operatorname{atan2}(r_{21}, r_{11}) \end{aligned} \tag{3.7} $$

Da später auch der Gradient der Rotationsmatrix $R(\gamma, \beta, \alpha)$ benötigt wird, soll an dieser Stelle auch die Angabe sämtlicher partieller Ableitungen erfolgen:

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial\gamma}R(\gamma,\beta,\alpha) &= \begin{pmatrix} 0 & c\alpha\, s\beta\, c\gamma + s\alpha\, s\gamma & -c\alpha\, s\beta\, s\gamma + s\alpha\, c\gamma \\ 0 & s\alpha\, s\beta\, c\gamma - c\alpha\, s\gamma & -s\alpha\, s\beta\, s\gamma - c\alpha\, c\gamma \\ 0 & c\beta\, c\gamma & -c\beta\, s\gamma \end{pmatrix} \\
\frac{\partial}{\partial\beta}R(\gamma,\beta,\alpha) &= \begin{pmatrix} -c\alpha\, s\beta & c\alpha\, c\beta\, s\gamma & c\alpha\, c\beta\, c\gamma \\ -s\alpha\, s\beta & s\alpha\, c\beta\, s\gamma & s\alpha\, c\beta\, c\gamma \\ -c\beta & -s\beta\, s\gamma & -s\beta\, c\gamma \end{pmatrix} \\
\frac{\partial}{\partial\alpha}R(\gamma,\beta,\alpha) &= \begin{pmatrix} -s\alpha\, c\beta & -s\alpha\, s\beta\, s\gamma - c\alpha\, c\gamma & -s\alpha\, s\beta\, c\gamma + c\alpha\, s\gamma \\ c\alpha\, c\beta & c\alpha\, s\beta\, s\gamma - s\alpha\, c\gamma & c\alpha\, s\beta\, c\gamma + s\alpha\, s\gamma \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.8}
$$

3.3 Roboterkinematik

Die Kinematik eines Roboters basiert auf den Regeln der Starrkörpermechanik. Die einzelnen mechanischen Komponenten eines Roboters werden mit Frames versehen und definieren somit die Beziehungen der Teile untereinander.

3.3.1 Gelenktypen

Verschiedene Gelenktypen sind in Abbildung 3.2 aufgeführt. Auf der linken Seite sind Drehgelenke, auf der rechten Seite Schubgelenke abgebildet. Beide Arten von Gelenken lassen sich kinematisch mittels eines Frames beschreiben. Einmal ist der Freiheitsgrad ein Drehwinkel (oder mehrere) und wird dem rotatorischen Anteil des Frames zugeordnet, ein anderes Mal ein Verfahrweg eines Schubgelenkes oder einer Linearachse und wird dem translatorischen Anteil zugeordnet. Allgemein lassen sich alle möglichen denkbaren Roboterkinematiken aus Anzahl und Reihenfolge der Gelenke definieren.

Der am weitaus häufigsten verwendete Robotertyp ist der Knickarmroboter, bestehend aus sechs Drehachsen (siehe Abbildung 3.3). Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich dieser Robotertyp behandelt.

3.3.2 Mechanische Entsprechung eines Frames

Identifiziert man die $i+1$-te Roboterachse, die einen Drehwinkel ϑ als Freiheitsgrad hat, mit einer Rotationsmatrix ${}^{i}_{i+1}R(\vartheta) := R(\vartheta, 0, 0)$, so legt man dadurch die Orientierung der $i+1$-ten Achse bezüglich der i-ten Achse fest. Hierbei wurde die Darstellung (3.6) benutzt und unterstellt, daß die Achse in Nullstellung parallel zur vorherigen Achse ist und um die Z-Achse dreht. Bei orthogonalen Achsen oder bei der Drehung um eine andere Koordinatenachse kann analog vorgegangen werden.

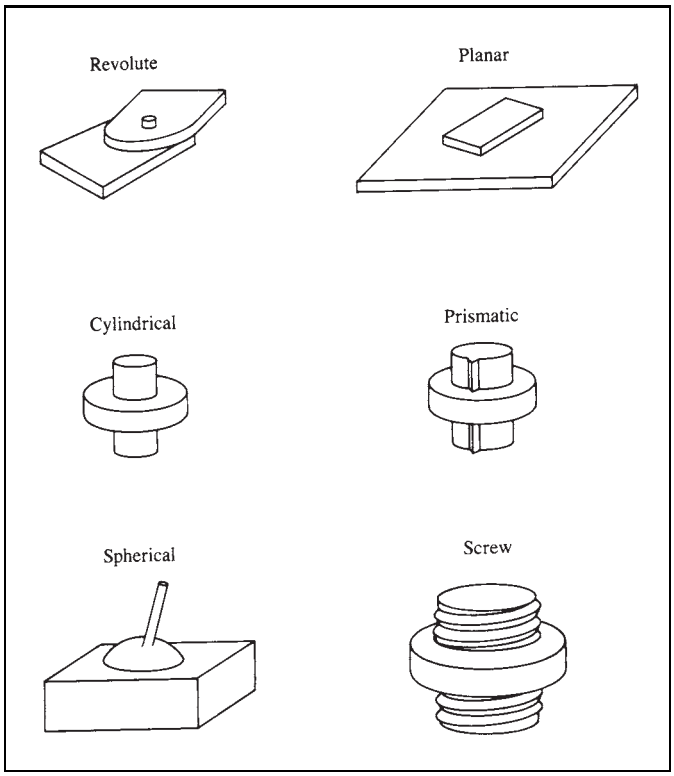


Abbildung 3.2: Dreh- und Schubgelenke

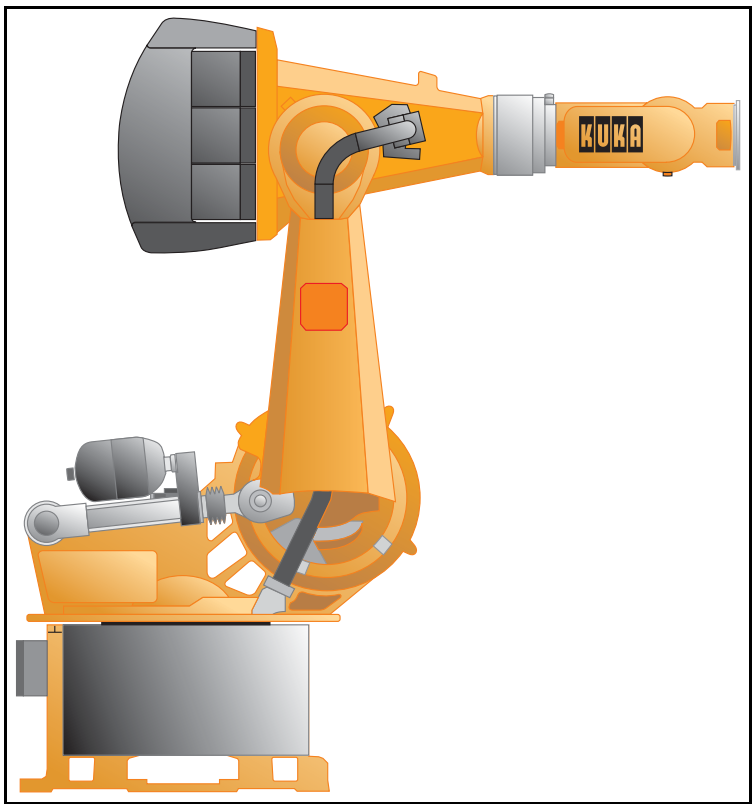


Abbildung 3.3: Knickarmroboter mit 6 Achsen

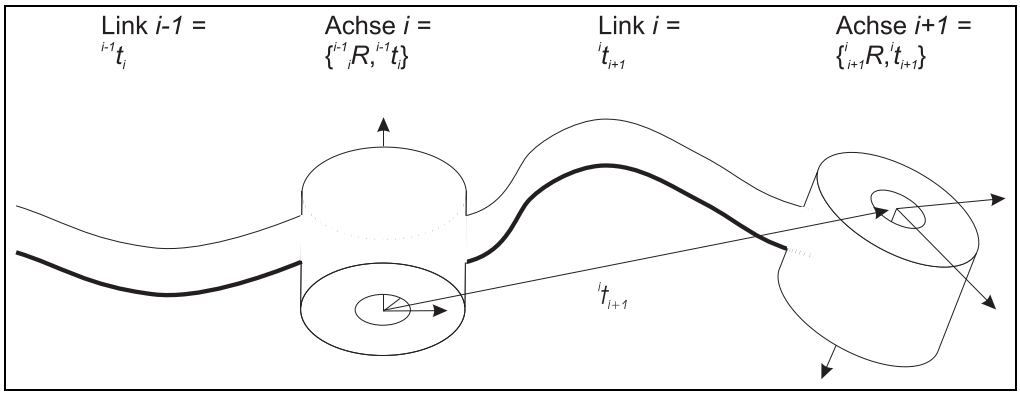


Abbildung 3.4: Interpretation eines Frames als Achse und Link

Identifiziert man die Verbindung (Link) der Achsen i und $i+1$ mit dem Translationsvektor ${}^{i}t_{i+1}$, kann die Beziehung zweier benachbarter Roboterachsen durch das Frame ${}^{i}_{i+1}T(\vartheta) = \left({}^{i}_{i+1}R(\vartheta), {}^{i}t_{i+1}\right)$ beschrieben werden (siehe Abbildung 3.4).

Insgesamt kann also die Transformationskette eines Roboters mit den Drehwinkeln $\vartheta_1, \ldots, \vartheta_d$ als Produkt von Frames dargestellt werden:

$$ {}^{0}_{n}T(\vartheta_1, \ldots, \vartheta_d) := \prod_{i=0}^{n-1} {}^{i}_{i+1}T(\vartheta_1, \ldots, \vartheta_d) \tag{3.9} $$

In dem Produkt (3.9) nehmen das erste ${}^{0}_{1}T$ und das letzte Frame ${}^{n-1}_{n}T$ eine Sonderstellung ein. Durch sie wird der Bezug zwischen Roboterbasis und Weltkoordinatensystem beziehungsweise Werkzeugkoordinatensystem und Roboterflansch hergestellt.

3.3.3 Beispiel für eine Transformationskette

Für die kinematische Beschreibung eines 6-achsigen Roboters benötigt man 6 Frames mit den Freiheitsgraden $\vartheta_1, \ldots, \vartheta_6$ für die 6 Achsen sowie optional 2 zusätzliche Frames um die Transformationen in das interne Roboterkoordinatensystem (Ir0) und in den Roboterflansch (Flansch) darzustellen (siehe Abbildung 3.5).

Wird der Roboter mit einem Werkzeug betrieben und steht er an einem speziellen Standpunkt, sind ein weiteres Frame am Anfang (Basis) und am Ende (Werkzeug) der Transformationskette nötig.

Insgesamt werden also in diesem Fall zur Beschreibung eines 6-achsigen Roboters 10 Frames benötigt.

3.4 Modellierung geometrischer Fehler

Bei der Modellierung der geometrischen Abweichungen geht es um die möglichst exakte Bestimmung der Transformationsparameter zweier aufeinanderfolgender Achsen. Die Parameter stellen Längen und Winkelangaben, also rein geometrische Größen, zur Beschreibung der Roboterkinematik dar. Durch Produktions- und Fertigungstoleranzen

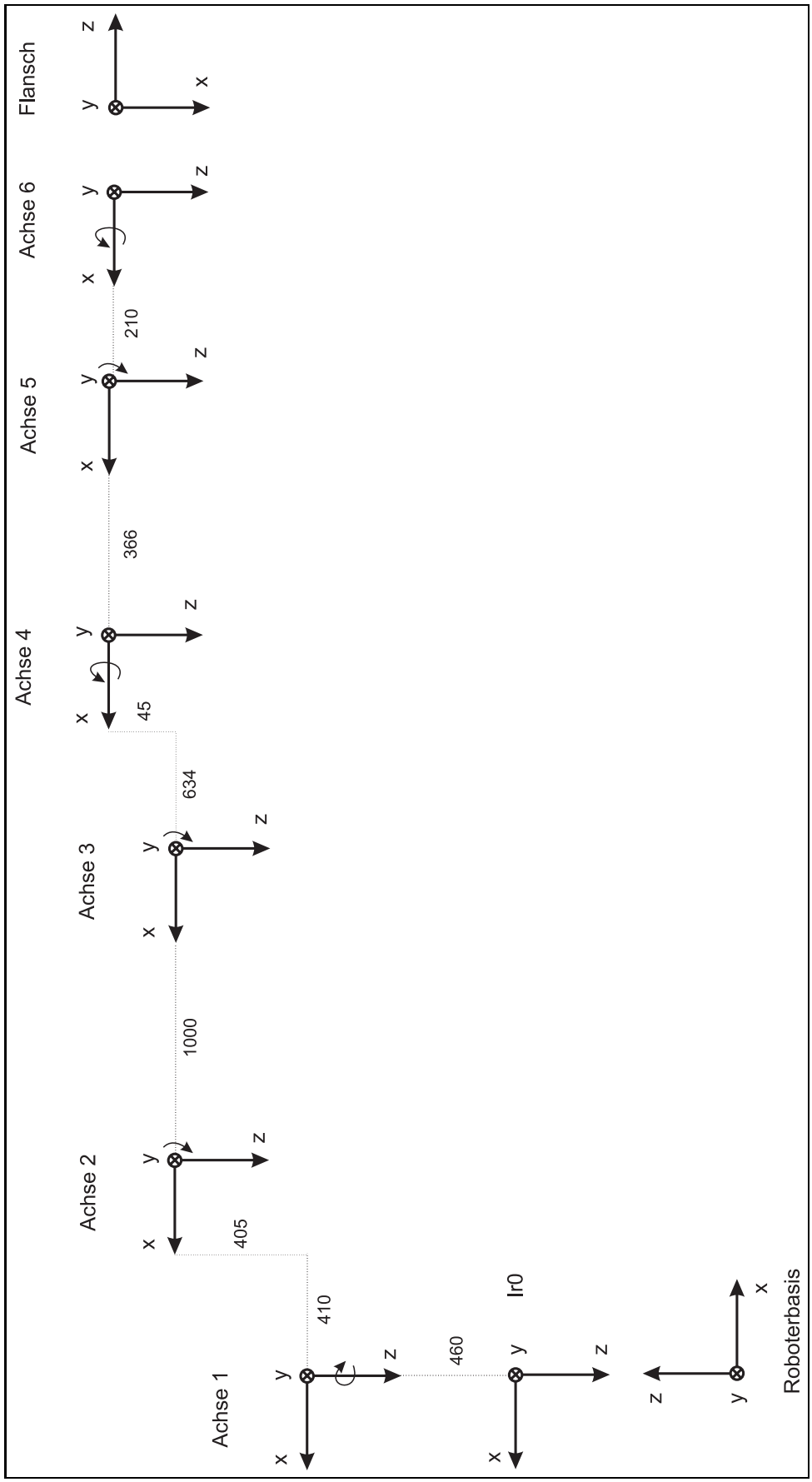


Abbildung 3.5: Kinematik eines Knickarmroboters mit 6 rotatorischen Achsen

weicht die reale Roboterkinematik von seinem nominalen Modell ab, was sich in einem Positionierungsfehler des Endeffektors niederschlägt. Die wichtigsten geometrischen Fehler sind Nullagenfehler, Abweichungen von der Parallelität und Orthogonalität, sowie Abstandsfehler aufeinanderfolgender Gelenkachsen.

3.4.1 Nullagenfehler

Unter Nullagenfehler versteht man die Abweichungen von den nominellen mechanischen Achsnullstellungen, die vom Konstrukteur definiert wurden. Um diese Referenzstellungen wiederherstellbar zu machen, wird bei den in dieser Arbeit untersuchten Robotern eine mechanische Referenz an den einzelnen Achsen verwendet, die mit einem elektrischen Meßtaster detektiert wird. Nullagenfehler können nun aufgrund einer falschen Position der mechanischen Referenz entstehen oder aus einer ungenauen Abtastung mittels des Meßfühlers herrühren. Für eine Drehachse mit dem Freiheitsgrad ϑ um die Z-Achse liefert

$$R_\vartheta(\lambda_1) := R(\vartheta + \lambda_1, 0, 0)\,, \quad \lambda_1 \approx 0\,,$$

die Modellierung eines Nullagenfehlers λ_1. Hierbei wurde die Darstellung (3.6) einer Rotationsmatrix benutzt.

3.4.2 Achsenschiefstände

Unter Achsenschiefständen versteht man die Abweichungen von der Parallelität oder Orthogonalität zweier aufeinanderfolgender Roboterachsen. Für zwei parallele Achsen bedeutet dies:

$$R_\vartheta(\lambda_2, \lambda_3) := R(\vartheta, \lambda_2, \lambda_3), \quad \lambda_2, \lambda_3 \approx 0\,.$$

Die Abweichungen der Parameter λ_2 und λ_3 von Null beschreiben in diesem Fall einen Parallelitätsfehler der Z-Achse. Im Falle orthogonal aufeinanderfolgender Roboterachsen werden Orthogonalitätsfehler durch Abweichungen von $\pi/2$ ausgedrückt.

Insgesamt läßt sich eine Roboterachse, die um die Z-Achse dreht und im Idealfall parallel zur vorherigen Achse ist, mittels der Darstellung (3.6) als Rotationsmatrix

$$R_\vartheta(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) := R(\vartheta + \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

in Abhängigkeit des Nullagenfehlers λ_1 und der Achsenschiefstände λ_2, λ_3 modellieren.

3.4.3 Längenabweichungen

Die Verbindung (Link) zweier aufeinanderfolgenden Roboterachsen können in allen drei Koordinatenrichtungen von den nominellen Sollwerten abweichen. Die Freiheitsgrade befinden sich in diesem Fall im Translationsanteil des Frames. Für ein Link mit der Länge d in Richtung der X-Achse sieht die Modellierung der Längenabweichungen wie folgt aus:

$$t_d(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6) := \begin{pmatrix} d + \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{pmatrix}, \quad \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6 \approx 0\,.$$

Abschließend liefert die Modellierung der geometrischen Abweichungen eines Frames 6 unbekannte Freiheitsgrade $\lambda_1, ..., \lambda_6$:

$$T(\lambda_1, ..., \lambda_6) := \Big(R_\vartheta(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3),\ t_d(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6) \Big) . \tag{3.10}$$

Es ist offensichtlich, daß nicht sämtliche Parameter mehrerer Frames voneinander unabhängig sind. So sind zum Beispiel die Abstände dreier aufeinanderfolgender Gelenke, wobei die Drehachse des mittleren parallel zur Translationsrichtung liegt (siehe Gelenke 3,4,5 in Abbildung 3.3), nicht linear unabhängig und somit auch nicht getrennt voneinander identifizierbar. Durch geeignete Plausibilitätsuntersuchungen können solche Abhängigkeiten von vornherein erkannt und eliminiert werden.

3.5 Modellierung nicht geometrischer Fehler

Um eine hohe statische Genauigkeit des Roboters zu erreichen, müssen neben den rein geometrischen Abweichungen auch diejenigen nicht geometrischer Natur berücksichtigt werden. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um

> Getriebenachgiebigkeiten, Balkenelastizitäten, Reibung, Umkehrspiel, Hysterese, mechanische Kopplung, Temperatureinflüsse.

Insbesondere nehmen die Getriebeelastizitäten bei der Modellierung den größten Raum ein. Die Massen der einzelnen Roboterachsen und die angebrachte Nutzlast erzeugen aufgrund der Schwerkraft in den Achsen Drehmomente, die von den Motoren und Getrieben nicht ausreichend kompensiert werden können, so daß es einerseits zu einem generellen Absinken der gesamten Mechanik, andererseits zu Torsionen in den Gelenken kommt. Hierbei werden mit dem Begriff Gelenkelastizität sämtliche elastischen Effekte einer Achse zusammengefaßt, unabhängig davon, ob sie antrieb- oder abtriebseitig entstehen.

Die Balkenelastizitäten, die für die Deformation der Links verantwortlich sind, können im Vergleich zu den Gelenkelastizitäten als unendlich steif angesehen und somit vernachlässigt werden. Wie Untersuchungen von Schröer [19] gezeigt haben, sind die Auswirkungen des Umkehrspiels, der Hysterese und der mechanischen Kopplung auf die Positioniergenauigkeit eines Roboters von untergeordneter Bedeutung und können ebenfalls vernachlässigt werden.

Zur Identifikation der Elastizitäten müssen die dazugehörigen Effekte während der Meßphase auch angeregt werden. Dies geschieht durch eine extern angebrachte Last und geeignete Posen im gesamten Achsraum des Roboters.

Die Wirkung des Umkehrspiels entfaltet sich nur, wenn in der entsprechenden Roboterachse kein Drehmoment in Richtung des Freiheitsgrades anliegt. Dies ist für Achse 1 stets der Fall, da diese Achse parallel zum Schwerkraftvektor dreht. Für alle anderen Achsen tritt dies nur sehr selten auf, nämlich wenn sie frei von Drehmoment in Kippstellung stehen. In den weitaus meisten Fällen wird aber das Umkehrspiel von der Gelenkelastizität überlagert und kann somit ebenfalls vernachlässigt werden. Für die Identifikation des Umkehrspiels in Achse 1 reicht eine Anregung des Systems durch eine extern angebrachte Last nicht aus. Hier muß das Spiel vielmehr durch positive und negative Verfahrwege

der Achse 1 direkt herausgemessen werden. Für die Kompensation ist dann entscheidend, aus welcher Richtung (in Achse 1) der gewünschte Zielpunkt angefahren wird. Da dies einen erweiterten Kompensationsalgorithmus erfordert, bleibt das Umkehrspiel der Achse 1 im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt. Dies bedeutet jedoch nicht, daß ihr Einfluß zu den vernachlässigbaren Größen gehört, sondern vielmehr, daß ihre Berücksichtigung eine weitere Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrierobotern darstellt.

Der Einfluß der Temperatur auf die Genauigkeit des Roboters darf nicht vernachlässigt werden. In Kapitel 6 wird darauf ausführlich eingegangen.

3.5.1 Lineare Elastizität

Bei der Modellierung der Gelenkelastizitäten liegt die berechtigte Vermutung zugrunde, daß ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen auftretendem Drehmoment m und der resultierenden Winkeländerung besteht. Für à priori unbekannte Elastizitätskoeffizienten $\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9$ läßt sich dieser lineare Zusammenhang als

$$(\Delta\gamma, \Delta\beta, \Delta\alpha)^T := \mathrm{diag}(\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9) \cdot m$$

ausdrücken. Die Werte $\Delta\gamma, \Delta\beta, \Delta\alpha$ bezeichnen hierbei die Änderungen der Drehwinkel eines Frames aufgrund des einwirkenden statischen Moments m.

Erweitert man die geometrische Modellierung eines Frames (3.10) um lineare Gelenkelastizitäten erhält man mit

$$T(\lambda_1, ..., \lambda_9) \;\; := \;\; \Big(R_\vartheta(\lambda_1 + \lambda_7 m_3,\, \lambda_2 + \lambda_8 m_2,\, \lambda_3 + \lambda_9 m_1),\, t_d(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)\Big)$$

ein komplettes Framemodell, das die wichtigsten geometrischen und nicht geometrischen Abweichungen enthält.

Wie bereits zuvor erwähnt, sind auch im Falle linearer Gelenkelastizitäten nicht alle Freiheitsgrade identifizierbar. Hier kann es insbesondere in Kombination mit Achsschiefständen und Nullagenfehlern zu linearen Abhängigkeiten kommen, die erkannt und eliminiert werden müssen.

3.5.2 Statische Drehmomente

Für die Identifikation und die anschließende Kompensation der Getriebenachgiebigkeiten sind die statischen Drehmomente in den einzelnen Roboterachsen erforderlich. Sie werden aufgrund der wirkenden Schwerkraft durch die Masse der aufgebrachten Nutzlast und die Massen der einzelnen Strukturelemente des Roboters erzeugt.

Die Berechnung der Drehmomente erfolgt beginnend mit dem letzten Frame der Transformationskette rekursiv nach den Regeln der klassischen Mechanik (siehe [14]). Das in jeder Achse wirkende Drehmoment setzt sich aus drei Teilmomenten zusammen (siehe Abbildung 3.6):

1. **Das Moment erzeugt durch die lokale Last**:
   Die lokale Last, ausgedrückt durch den Gravitationsvektor ${}^i g_i$ und dem Schwerpunkt ${}^i s_i$ bezüglich der i-ten Roboterachse, bewirkt das lokale Drehmoment:

$$ {}^i m_i^{(1)} := {}^i s_i \times {}^i g_i = {}^i s_i \times \left({}^0_i R\right)^T {}^0 g_i $$

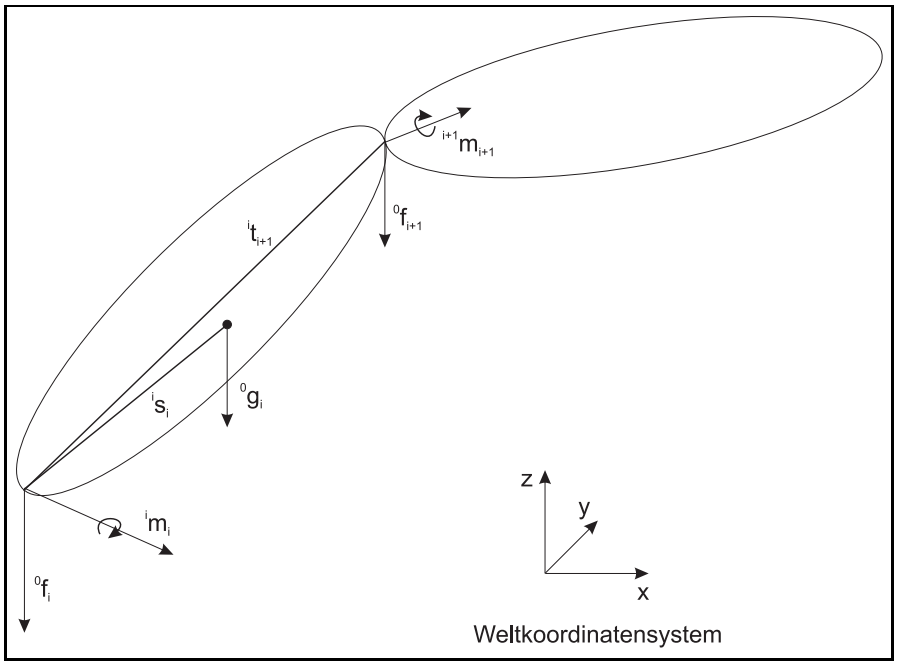


Abbildung 3.6: Drehmomentberechnung einer Achse

2. **Das Moment erzeugt durch die Last aller vorherigen Achsen**:
   Die Summe ${}^0f_{i+1}$ aller lokalen Gravitationsvektoren ${}^0g_k, k = n, \ldots, i+1$ der vorherigen Achsen hat seinen Schwerpunkt am Ende des i-ten Links, also bei ${}^it_{i+1}$ und erzeugt somit das Drehmoment:

$$ {}^im_i^{(2)} := {}^it_{i+1} \times {}^if_{i+1} = {}^it_{i+1} \times \left({}^0_iR\right)^T {}^0f_{i+1} $$

3. **Das freie Moment der vorherigen Achse**:
   Das freie Moment ${}^{i+1}m_{i+1}$ der Achse $i+1$ überträgt sich direkt auf die i-te Achse:

$$ {}^im_i^{(3)} := {}^im_{i+1} = {}^i_{i+1}R\ {}^{i+1}m_{i+1} $$

Insgesamt lassen sich die Drehmomente der Achsen gemäß folgender Rekursionsformel berechnen:

$$
\begin{aligned}
&\text{Für } i = n \\
&{}^0f_n := {}^0g_n \\
&{}^nm_n := {}^ns_n \times \left({}^0_nR\right)^T {}^0g_n \\
&\\
&\text{Für } i = n-1, \ldots, 0 \\
&{}^0f_i := {}^0g_i + {}^0f_{i+1} \\
&{}^im_i := {}^im_i^{(1)} + {}^im_i^{(2)} + {}^im_i^{(3)} = \\
&\qquad {}^is_i \times \left({}^0_iR\right)^T {}^0g_i + {}^it_{i+1} \times \left({}^0_iR\right)^T {}^0f_{i+1} + {}^i_{i+1}R\ {}^{i+1}m_{i+1}
\end{aligned}
\tag{3.11}
$$

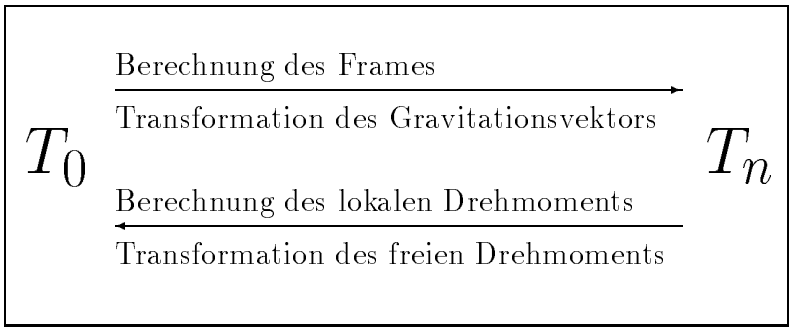


Abbildung 3.7: Algorithmus der Drehmomentberechnung

3.5.3 Algorithmus der Drehmomentberechnung

Die Rekursionsformel (3.11) zur Berechnung der statischen Drehmomente ist zwar im formalen Sinne richtig, allerdings widerspricht die direkte algorithmische Umsetzung einer schnellen Auswertung der Vorwärts- und Rückwärtskinematik. In jedem Rekursionsschritt i ist nämlich die Transformation der beiden Gravitationsvektoren ${}^0g_i$ und ${}^0f_{i+1}$ aus dem Weltkoordinatensystem in das i-te Koordinatensystem nötig. Durch Ausnutzung der Linearität der Matrix-Vektor-Multiplikation kann die Effizienz der Rekursionsformel wesentlich gesteigert werden. Transformiert man nur den normierten Gravitationsvektor $(0,0,g)^T$, der in Richtung der positiven Z-Achse wirkt, durch die Transformationskette, läßt sich dieser mit

$$R\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} = mR\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

auf die individuelle Masse m des Gelenks skalieren. Auf diese Weise muß nur ein Gravitationsvektor transformiert werden und die Transformation erfolgt sukzessive durch die ganze Kette von Frames.

In Abbildung 3.7 ist der Algorithmus zur Berechnung der statischen Drehmomente nochmals zusammenfassend dargestellt. Beginnend mit dem ersten werden die Frames sukzessive berechnet, indem jeweils die Achswinkel angelegt und die Elementeinträge der Rotationsmatrizen ausgewertet werden. Sobald ein Frame feststeht, läßt sich bereits der Gravitationsvektor in das nächst höhere Koordinatensystem transformieren. Ist man schließlich am letzten Frame angelangt, geht man von oben nach unten durch die Kette zurück. Die Gravitationsvektoren stehen nun fest, so daß die lokalen Drehmomente berechnet werden können. Das freie Moment des vorherigen Frames wird in das aktuelle Koordinatensystem transformiert und ergibt zusammen mit dem lokalen Moment das neue, freie Moment für das nächste Frame. Sobald das gesamte wirkende Drehmoment feststeht, kann die resultierende Winkeländerung aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Nachgiebigkeit und Moment berechnet werden, was wiederum eine erneute Auswertung des beteiligten Frames nach sich zieht.

Streng genommen stellt die Berechnung der statischen Drehmomente eine Fixpunktiteration dar. Die Winkeländerungen beeinflußen nämlich die Transformationen der Gravitationsvektoren, was sich wiederum in einer Änderung der Momente und damit der Winkel äußert. Allerdings sind die Auswirkungen dieser Rekursion so gering, daß die Iteration bedenkenlos nach dem ersten Schritt abgebrochen werden kann.

3.6 Kompensation

Angenommen, die Modellierung der Vorwärtskinematik ist abgeschlossen und mit $\lambda \neq 0$ ist ein Parametervektor bekannt, der die kinematischen Fehler eines realen Roboters gut beschreibt. Dann liefert die modifizierte Vorwärtskinematik $\tilde{T} = T(\lambda)$ bei gegebenem Achswinkelvektor ϑ gute Voraussagen über die reale Stellung $\tilde{F}$ des Endeffektors:

$$\tilde{T}(\vartheta) = \tilde{F}$$

Es kann also, im Rahmen gewisser Genauigkeiten, zu jeder Achsstellung ϑ die tatsächliche Position und Orientierung $\tilde{F}$ des Endeffektors angegeben werden.

3.6.1 Inverse Kinematik

Umgekehrt ist dies leider nicht möglich. Um allein aus der Kenntnis des Endeffektors $\tilde{F}$ auf die am Roboter anliegenden Achswinkel ϑ zu schließen, wird eine inverse Kinematik $\tilde{T}^{-1}$ benötigt. Inverse Kinematiken sind aber nur in Einzelfällen in analytischer Form darstellbar. Bei deren Herleitung spielen stets einfache geometrische Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Ohne diese Vereinfachungen ist eine analytische Herleitung der inversen Kinematik im allgemeinen nicht möglich. Die Rückwärtstransformation von Manipulatoren mit 6 rotatorischen Achsen basiert beispielsweise auf der Separierung von Position und Orientierung. Diese ist aber nur möglich, da die 3 Handachsen einen gemeinsamen Schnittpunkt, den sogenannten Handwurzelpunkt, besitzen. Darüber hinaus hat auch die Parallelität von Achse 2 und Achse 3 entscheidenden Einfluß auf die analytische Lösbarkeit.

Da die modifizierte Kinematik $\tilde{T}$ diese vereinfachenden Eigenschaften gerade nicht aufweist und die Stellungen der Gelenke aufgrund der Elastizitäten noch nicht einmal konstant zueinander sind, ist es ausgeschlossen, eine Inverse in analytischer Form anzugeben.

Eine Inverse kann also nur numerisch bestimmt werden. Naheliegend ist es, dasselbe Verfahren anzuwenden, das in Kapitel 5 zur Bestimmung des Parametervektors λ vorgestellt wird. Die Achswerte ϑ übernehmen hierbei die Rolle der Freiheitsgrade. Verfahren dieser Art sind allerdings immer iterativer Natur und können wegen ihrer hohen Laufzeit nur Offline eingesetzt werden.

Offline bedeutet in diesem Zusammenhang das Konvertieren bestehender Roboterprogramme außerhalb des eigentlichen Programmablaufes. Hierbei werden die einzelnen Zielpunkte nominell so modifiziert, daß aufgrund der tatsächlichen Kinematik später die gewünschten Punkte erreicht werden. Dieses Vorgehen birgt allerdings einige Risiken in sich. Zum Beispiel muß gewährleistet werden, daß jeder Zielpunkt genau einmal den Konvertieralgorithmus durchläuft. Außerdem müssen zur Kompensation der Nachgiebigkeiten stets die korrekten Lastdaten des eingesetzten Werkzeugs bekannt sein. Bei weitverzweigten Roboterprogrammen mit einer Vielzahl an Unterprogrammen und häufigem Werkzeugwechsel ein schier hoffnungsloses Unterfangen.

3.6.2 Approximation

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein anderer Ansatz gewählt. Die Entwicklung einer schnellen Fehlerkompensation, basierend auf einer Approximation der inversen Ki-

nematik und deren Integration in die Robotersteuerung.

Für die Approximation der modifizierten Inversen stehen nur die Standard-Rückwärtstransformation T^{-1} und die modifizierte Vorwärtstransformation $\tilde{T}$ zur Verfügung. Die Idee besteht nun darin, zu einem gegebenen Zielframe F ein modifiziertes Frame F^* zu finden, so daß die Gelenkwinkel $T^{-1}(F^*)$ unter $\tilde{T}$ auf das gewünschte Zielframe F abgebildet werden:

$$\tilde{T}\left(T^{-1}(F^*)\right) = F\,.$$

Freilich ist die Konstruktion von F^* gleichbedeutend mit der von $\tilde{T}^{-1}$, aber dennoch läßt sich dadurch eine gute Approximation mit

$$\begin{aligned} \tilde{T}^{-1}(F) &\approx T^{-1}(F^*) \quad \text{mit} && (3.12)\\ F^* &= F\tilde{F}^{-1}F \quad \text{und} && (3.13)\\ \tilde{F} &= \tilde{T}\left(T^{-1}(F)\right) && (3.14) \end{aligned}$$

ableiten. Abbildung 3.8 veranschaulicht das Prinzip zur Bildung einer Approximation der inversen Kinematik und in Abbildung 3.9 ist der gesamte Algorithmus zusammengefaßt dargestellt.

Bei der Approximation (3.12) handelt es sich um eine Approximation 1. Ordnung. Angenommen, die Kinematik $\tilde{T}$ unterscheidet sich von der Kinematik T nur durch konstante Positionierungs- und Orientierungsfehler, dann ist die Approximation (3.12) exakt.

Beweis: Zu zeigen ist $\tilde{T} \cdot \tilde{T}^{-1} = \mathrm{id}$.
Für ein beliebiges Frame F sei

$$FG = \tilde{F} = \tilde{T}\left(T^{-1}(F)\right)\,,$$

mit einem konstanten Frame G.

Dann ist

$$\tilde{T}\left(T^{-1}(FG^{-1})\right) = F\,,$$

weil

$$G = F^{-1} \cdot \tilde{T}\left(T^{-1}(F)\right) = F^{-1}\tilde{F}$$

ist

$$FG^{-1} = F\tilde{F}^{-1}F = F^*\,.$$

Da F^* und $\tilde{F}$ wie in (3.13) und (3.14) definiert, ist die Behauptung bewiesen.

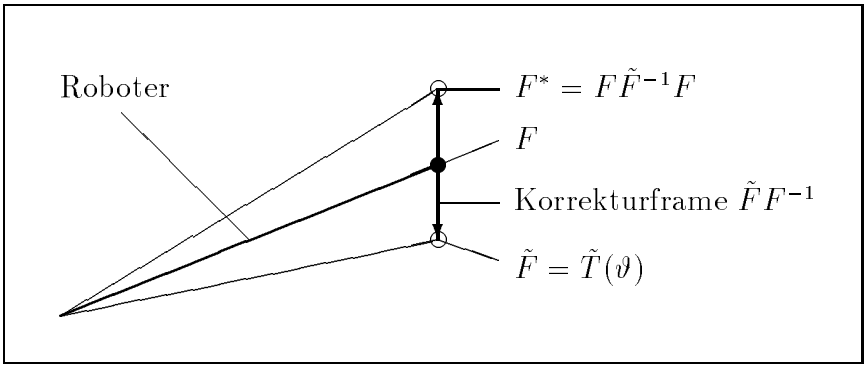


Abbildung 3.8: Approximationsprinzip für die modifizierte inverse Kinematik

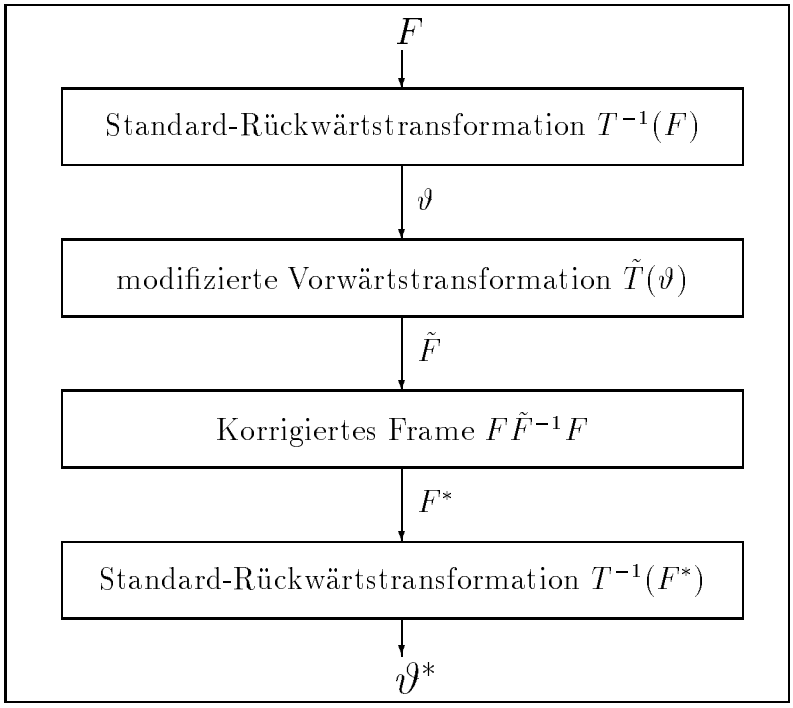


Abbildung 3.9: Approximationsalgorithmus für die modifizierte inverse Kinematik

Kapitel 4

Meßverfahren

4.1 Einleitung

Unerlässliche Voraussetzung für sämtliche Kalibrationsverfahren zur Identifikation der Modellparameter sind leistungsfähige Sensorsysteme, die eine zuverlässige, genaue und schnelle Erfassung des TCP (Tool Center Point) ermöglichen.

In jüngster Zeit wurden taktil tastende Verfahren durch optische, berührungslose Verfahren weitgehend verdrängt. Dies liegt nicht zuletzt an der wesentlich höheren Abtastgeschwindigkeit und dem deutlich niedrigeren Preis optischer Systeme.

Alle hier vorgestellten optischen Verfahren basieren auf der Vermessung sogenannter Targets. Dies sind spezielle, dem jeweiligen Meßsystem angepaßte Meßmerkmale. Die eigentliche Vermessung besteht aus einer statischen 3D-Digitalisierung und liefert dementsprechend 3D-Koordinaten des jeweiligen Targets. Sofern vorhanden, können mehrere 3D-Messungen in einer 6D-Information zusammengefaßt werden. Als einziges nicht berührungsloses Verfahren wird hier ein Abstandsverfahren beschrieben. Es handelt sich hierbei um ein 1D-Meßverfahren, das den Abstand des TCPs vom Meßsystem aufgrund der Länge eines abgespulten Fadens mißt.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der eingesetzten Meßverfahren liefert der Standort des Meßsystems. Große Meßsysteme mit großem Sichtbarkeitsbereich werden meist in Superposition zum Roboter gebracht. Das heißt, sie befinden sich während des gesamten Meßvorgangs ortsfest in einiger Entfernung zum Roboter und beobachten Targets, die am Roboterflansch angebracht sind. Umgekehrt stellt sich die Situation nach dem „Auge-in-Hand“-Prinzip dar. Hier ist der Sensor am Roboterflansch befestigt und mißt Targets, die sich ortsfest innerhalb des Arbeitsbereiches des Roboters befinden. Diese Methode eignet sich besonders für kleine, kostengünstige Sensoren mit entsprechend kleinem Sichtbarkeitsbereich.

Sämtliche Verfahren und Sensorsysteme, die im Rahmen dieses Kapitels vorgestellt werden, wurden zur Kalibrierung von Industrierobotern eingesetzt. In Abschnitt 8.3 kann eine Beschreibung der einzelnen Softwarepakte gefunden werden, die die Anbindung und Steuerung der verschiedenen Systeme realisieren.

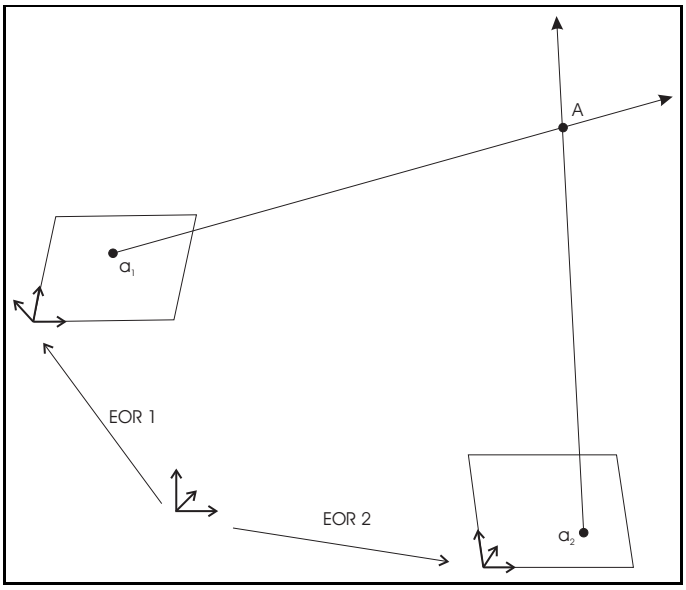


Abbildung 4.1: Vorwärtsschnitt

4.2 Photogrammetrische Verfahren

Die Photogrammetrie ist ein Verfahren, mit dem Objekte an Hand von Bildern dreidimensional vermessen werden können. Die photographische Abbildung in einer Kamera läßt sich mathematisch als Zentralprojektion des Objektraumes auf die Filmebene beschreiben. Jeder Objektpunkt wird dabei auf einen Bildpunkt abgebildet, der den Durchstoßpunkt des Projektionsstrahls mit der Bildebene darstellt. Der Projektionsstrahl läuft hierbei durch das Projektionszentrum. Weiterführende Informationen zu diesem Thema können dem Buch von Atkinson [1] entnommen werden.

4.2.1 Vorwärtsschnitt

Die Lage einer Kamera bezüglich des Weltkoordinatensystems wird als die sogenannte äußere Orientierung (Exterior Orientation = EOR) bezeichnet. Sind für zwei Kameras die dazugehörigen äußeren Orientierungen bekannt, so können die Koordinaten eines Objektpunktes A über die Messungen der beiden Bildpunkte a_1 und a_2 mittels eines räumlichen Vorwärtsschnitts (siehe Abbildung 4.1) berechnet werden. Der Objektpunkt A ist dann der Schnittpunkt der beiden Geraden, die durch die Bildpunkte a_1 und a_2 und die jeweiligen Projektionszentren gebildet werden.

4.2.2 Rückwärtsschnitt

Das umgekehrte Prinzip wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Hier läßt sich aus der Kenntnis dreier Objektpunkte A, B, C im Weltkoordinatensystem und den dazugehörigen Messungen der Bildpunkte a, b, c mittels eines räumlichen Rückwärtsschnitts die äußere Orientierung der Kamera bestimmen. Die Berechnung der Lage der Kamera erfolgt über die analytische Lösung der sogenannten Kollinearitätsgleichungen. Stehen mehr als drei Punkte zur Verfügung, werden die Gleichungen linearisiert und die gesuchte Orientierung ergibt sich als Lösung eines iterativen Least-Square-Verfahrens.

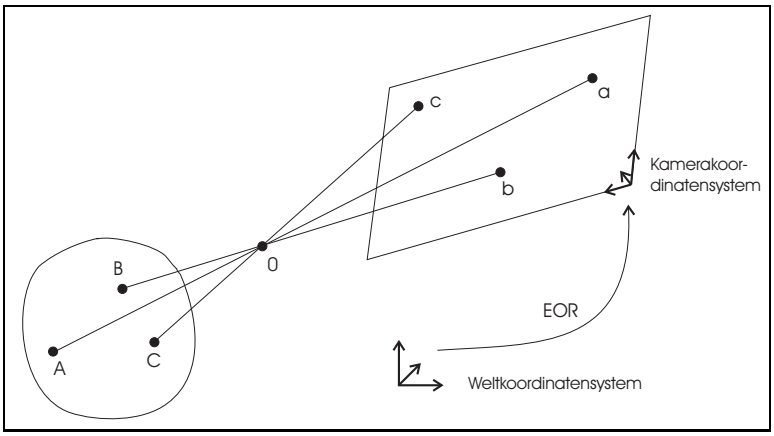


Abbildung 4.2: Rückwärtsschnitt

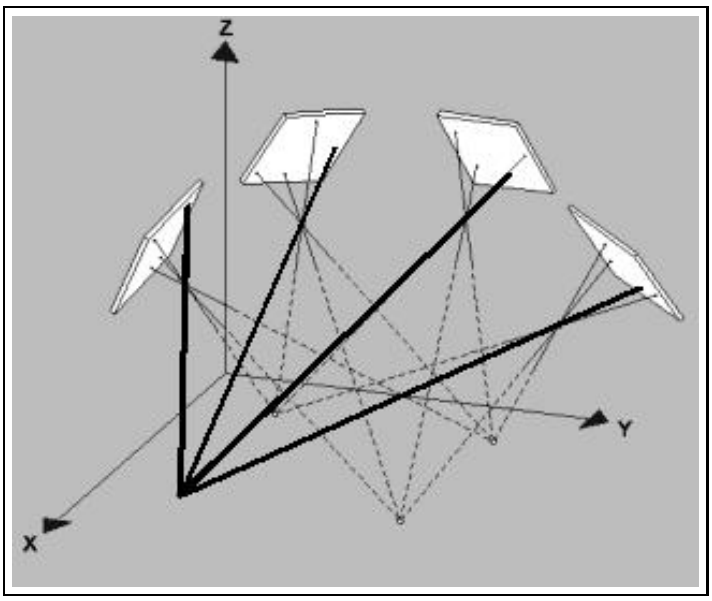


Abbildung 4.3: Mehrbildorientierung

4.2.3 Mehrbildausgleich

Das Verfahren des Mehrbild- oder Bündelausgleichs kommt zum Einsatz, falls weder die äußere Orientierung der Kamera noch die Positionen der Objektpunkte bekannt sind. Ausgehend von einem Bildpunkt, läßt sich der Projektionsstrahl über das Projektionszentrum in den Objektraum verlängern. Dadurch ist zunächst die Richtung bekannt, in der sich der gesuchte Objektpunkt befindet. Die räumliche Lage eines Punktes kann nun bestimmt werden, indem man die Projektionsstrahlen weiterer Bilder hinzuzieht und diese im Objektraum zum Schnitt bringt. Der gesuchte Objektpunkt ist der Schnittpunkt aller zugehöriger Strahlen (siehe Abbildung 4.3). Die zur Rekonstruktion des Projektionsstrahls notwendige Kenntnis der Raumlage der Kamera läßt sich im Algorithmus des Bündelausgleichs zusammen mit den Koordinaten der gesuchten Objektpunkte berechnen.

Das Verfahren des Mehrbildausgleiches wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Erzeugung der Maß- beziehungsweise der Kalibrierkörper eingesetzt. Sowohl die Meßtafel (Abbildung 5.1), als auch die Kalibrierkugel (Abbildung 6.3) tragen retroreflektierende Marken,

Abbildung 4.4: Réseau-Scanning-Kamera (RSC)

die sich aufgrund ihres starken Hell/Dunkel-Kontrastes optimal für die Algorithmen der elektronischen Bildverarbeitung eignen. Von diesen Körpern werden nun mit einer metrischen Digitalkamera bis zu 200 Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven gemacht. Hierbei ist darauf zu achten, daß jede Marke in ausreichend vielen verschiedenen Bildern aufgenommen wird. Anschließend werden die einzelnen Bilder mittels des Bündelausgleichs wieder zu einem Ganzen zusammengesetzt, und man erhält die dreidimensionalen Objektkoordinaten jeder Marke bezüglich eines beliebig festzulegenden Koordinatensystems.

4.2.4 Réseau-Scanning-Kamera

Traditionelle metrische Kameras, bei denen zur digitalen Objekterfassung Flächensensoren eingesetzt werden, erreichen aufgrund ihres kleinen Bildformates nur Auflösungen im Bereich von 1:10.000. Zur Steigerung der Genauigkeit muß entweder die Bildmeßgenauigkeit verbessert oder das Bildformat vergrößert werden. Da die Erhöhung der Bildmeßgenauigkeit durch die physikalische Begrenzung hinsichtlich der Pixelgröße eingeschränkt ist, muß das Sensorformat, d.h. die Anzahl der Bildpunkte, erhöht werden. Flächensensoren mit erheblich größerer Anzahl von Bildsensoren sind allerdings sehr teuer oder nicht verfügbar. Bereits 1984 wurde von Wester-Ebbinghaus [25] das Prinzip des Réseau-Scannings entwickelt, das 1990 in Zusammenarbeit mit Riechmann [17] und der Firma Rollei in der Konstruktion der Réseau-Scanning-Kamera (siehe Abbildung 4.4) mündete.

Das Prinzip besteht darin, großformatige Bilder durch sequentielle Zerlegung in Teilbilder mittels Standard-Flächensensoren zu erfassen und diese anschließend wieder zu einem Gesamtbild zusammenzufügen.

Wie herkömmliche metrische Kameras, besitzt auch die RSC ein sogenanntes Réseau, bestehend aus einer im Kameragehäuse fixierten Glasplatte mit aufgebrachten Gitternetz. Das Gitternetz wird bei jeder Aufnahme eingeblendet und definiert dadurch das Bildkoordinatensystem. Allerdings ist das Réseau bei der RSC um den Faktor 10 größer als der verwendete Flächensensor, der mit Hilfe zweier Schrittmotoren beliebig innerhalb des Réseaus positionierbar ist (Abbildung 4.5). Um eine hohe Tiefenschärfe zu erreichen, ist außerdem der Abstand zwischen Glasgitterplatte und Sensor zum Zwecke einer individuellen Fokussierung veränderbar.

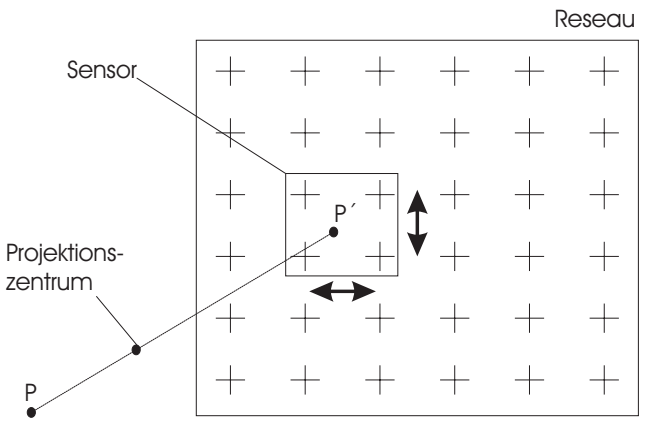


Abbildung 4.5: Prinzip des Réseau-Scannings

Eine Messung findet in zwei Schritten statt. Zuerst wird das Objekt auf den Sensor abgebildet. Der Abstand zwischen Réseau und Sensor ist dabei so groß, daß die Schattenbildung der Résaukreuze bei geöffnetem Kameraverschluß auf dem Sensor nicht mehr sichtbar ist. Im zweiten Schritt wird bei geschlossenem Kameraverschluß das Réseau mit Hilfe einer internen punktförmigen Beleuchtungsquelle auf den Sensor projiziert.

Durch die im Sensorsystem gemessenen Koordinaten der Réseaukreuze und der Réseausollkoordinaten kann der Sensor präzise im Gitternetz orientiert und das Teilbild anschließend in das Gesamtbild transformiert werden.

Auf diese Weise ist es gelungen, Auflösungen von 1-2 x 10^5 zu erreichen, also die Genauigkeit gegenüber herkömmlichen Systemen um den Faktor 10 zu steigern. Die durch die sequentielle Messung der Teilbilder bedingte längere Vermessungszeit stellt sicherlich den größten Nachteil dieser Methode dar, wird aber in Anbetracht der hohen erzielten Genauigkeiten bei der stationären Robotervermessung bewußt in Kauf genommen.

4.2.5 Infrarotsensor

Ein weiteres Meßsystem, das nach dem Prinzip der Photogrammetrie arbeitet, ist das in Abbildung 4.6 dargestellte Rodym6D der Firma Krypton. Im Sensorgehäuse sind drei CCD-Zeilenkammeras fixiert, deren relative Orientierungen durch eine Kamerakalibration ermittelt werden. Linsensysteme projizieren das von einer LED emittierte Infrarotlicht auf die Bildebenen der Zeilenkameras. Über einen räumlichen Vorwärtsschnitt der drei Bildkoordinaten kann die Position der LED ermittelt werden. Werden mindestens drei LEDs auf einem starren Körper, der sogenannten Probe, angebracht, so kann neben der Position auch die Orientierung des Körpers ermittelt werden. Befestigt man diese Probe am Roboterflansch, kann mit diesem System eine 6D-Robotervermessung durchgeführt werden.

Aufgrund der hohen Meßgeschwindigkeit eignet sich dieses System sehr gut für dynamische Messungen. Der entscheidende Vorteil für die stationäre Robotervermessung liegt dagegen in der hohen Mobilität des Kamerasystems. Da die einzelnen CCD-Kameras in einem Gehäuse stabil fixiert sind und somit die äußere Orientierung konstant bleibt, kann das System leicht transportiert und innerhalb weniger Minuten eingesetzt werden.

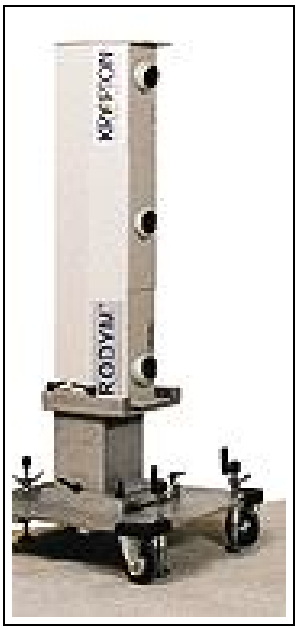


Abbildung 4.6: Rodym6d der Firma Krypton

Ein aufwendiges Einmessen, wie es bei Verwendung zweier RSC-Kameras der Fall ist, entfällt hier vollständig.

Die Genauigkeit des Rodym6D liegt etwas unterhalb der des RSC-Systems. Insbesondere kann sich wegen der Verwendung von Infrarotlicht der Einfluß von Wärmequellen nachteilig auf die Genauigkeit der Messungen auswirken.

4.3 Tachymetrische Verfahren

Unter tachymetrischen Meßsystemen versteht man 3D-Koordinatenmeßsysteme, die in Polarkoordinaten messen. Die Position eines anvisierten Punktes wird über den horizontalen und vertikalen Winkel und über den Abstand zum Merkmal ermittelt. Eine anschließende Transformation in kartesische Koordinaten ist üblich.

Bei dem in Abb. 4.7 abgebildeten Lasertracker der Firma Leica erfolgt die Winkelmessung über Winkelencoder und die Entfernungsmessung mittels eines Laserinterferometers. Der Zielpunkt wird durch einen Reflektor signalisiert, der aus drei zueinander senkrechten Spiegeln bestehend, das einfallende Laserlicht parallel zurückwirft. Diese Targets sind in Form von Metallkugeln ausgebildet und werden in sogenannte magnetische „Nester“ eingelegt. Über Servomotoren ist der Lasertracker in der Lage, auch schnell bewegte Targets zu verfolgen.

Das herausragendste Merkmal des Lasertrackers ist die enorme Genauigkeit im Bereich von wenigen Tausendstel Millimetern und der riesige Arbeitsbereich von bis zu 60 Metern. Dennoch ist das System für die Robotervermessung nur bedingt geeignet, da der Laserstrahl während der gesamten Vermessung nicht abreißen darf, was durch Orientierungsänderungen außerhalb des Sichtbarkeitsbereiches während der Roboterbewegung unvermeidlich ist. Nach einem solchen Abriß muß der Kontakt zu dem Target durch manuelles Einlegen des Targets in seine Home-Position wieder aufgenommen werden. Dieser

Abbildung 4.7: Lasertracker der Firma Leica

Nachteil wurde in jüngster Zeit durch ein zusätzliches Softwarepaket kompensiert, das es erlaubt, den Laserstrahl nach Sollkoordinaten zu positionieren. Dadurch wurde es erst möglich, zur Erlangung einer Orientierungsinformation mehrere Targets am Roboterflansch zu messen. Der Preis für diesen zusätzlichen Komfort ist allerdings in Form eines Verlustes an Genauigkeit zu bezahlen.

4.4 Lasertriangulationsverfahren

Lasertriangulationssensoren sind bei der Objektvermessung im Nahbereich sehr verbreitet. Sie zeichnen sich durch einen relativ einfachen Aufbau, eine robuste Arbeitsweise und durch Flexibilität in den Meßstrategien aus.

Neben dem in Abbildung 4.8 abgebildeten flächenhaft (dreidimensional) arbeitenden Triangulationssensor der Firma Perceptron, gibt es noch linienhaft (zweidimensional) und punktförmig (eindimensional) messende Ausführungen.

Abbildung 4.9 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines eindimensional messenden Lasertriangulationssensor. Der von einem Laser ausgesandte Laserstrahl wird auf der Oberfläche des Meßobjekts durch diffuse Lichtstreuung reflektiert und von einer Abbildungsoptik auf einen CCD-Chip abgebildet. Die gemessenen Bildkoordinaten x'_p liefern zusammen mit der bekannten Sensorgeometrie B und H den Abstand zum Meßobjekt gemäß

$$z_p = H \,/\, (1 - B/x'_p)\,.$$

Zweidimensional messende Lasertriangulationssensoren werden hauptsächlich zur Vermessung von Kanten eingesetzt. In diesem Fall wird statt eines punktförmigen Laserstrahls eine Laserlinie ausgesandt, die möglichst senkrecht auf der zu messenden Kante auftreffen sollte. Das eingefangene Sensorbild prägt sich dann als Knick aus, der als Schnittpunkt zweier sich schneidender Geraden interpretiert werden kann.

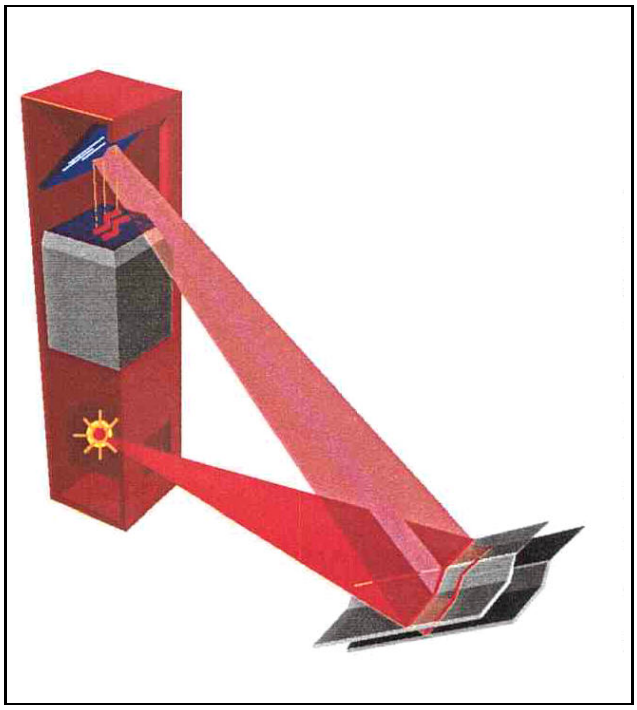


Abbildung 4.8: Lasertriangulationssensor der Firma Perceptron

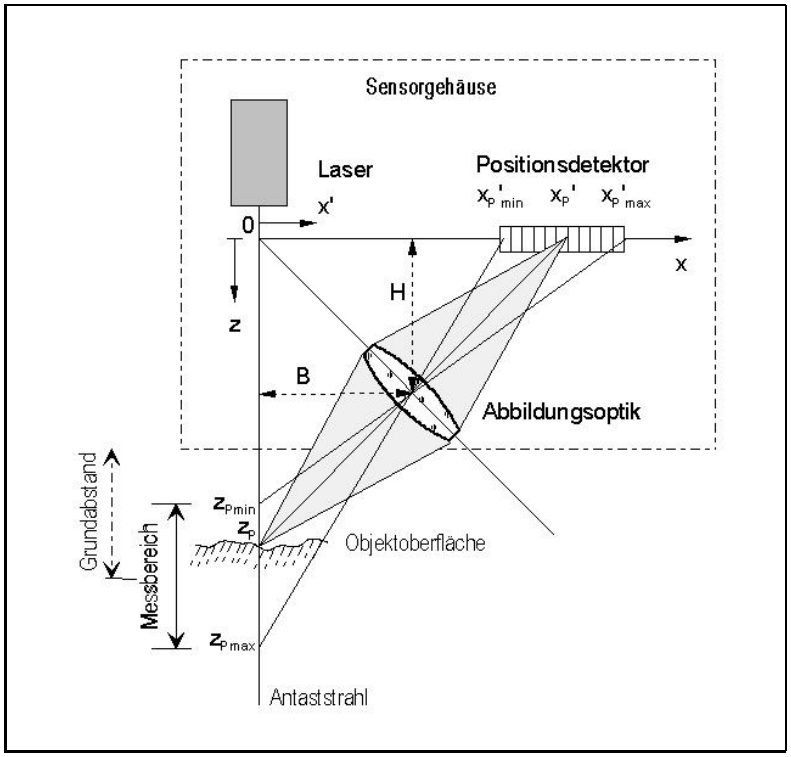


Abbildung 4.9: Prinzip der Lasertriangulation

Abbildung 4.10: Fadensystem der Firma Dynalog

Im Falle eines dreidimensionalen Lasertriangulationssensors wird neben der Abstandsmessung eine zweidimensionale Flächenmessung durchgeführt. Um ein möglichst kontrastreiches Bild zu erhalten, wird die Fläche, auf der sich das dreidimensional ausgeprägte Merkmal, wie Loch oder Punkt, befindet, mit unstrukturiertem Licht angestrahlt. Der mittels Methoden der digitalen Bildverarbeitung ermittelte Ellipsenschwerpunkt des empfangenen Sensorbildes liefert dann zusammen mit der zuvor gewonnen Abstandsinformation die gewünschten 3D-Koordinaten des Meßmerkmals.

Für die Robotervermessung mit Lasertriangulationssensoren muß das Meßprinzip wegen des kleinen Sichtbarkeitsbereiches der Sensoren umgekehrt werden. Die Beobachtung von Targets am Roboterwerkzeug durch einen feststehenden Triangulationssensor ist nicht möglich. Stattdessen wird der Sensor an der Roboterhand angebracht und vermißt nach dem „Auge-In-Hand“-Prinzip feststehende Targets.

4.5 Abstandsverfahren

Als einziges, nicht berührungsloses Meßsystem wurde das Fadensystem der Firma Dynalog zur Kalibrierung von Robotern eingesetzt (siehe Abbildung 4.10). Das System wird in der Nähe des Roboters fixiert und das lose Ende des Fadens am Roboterwerkzeug angebracht. Die Länge des abgespulten Fadens liefert dann den Abstand zum Meßsystem.

Der Vorteil dieses Systems liegt in der sehr einfachen Handhabung und dem niedrigen Preis. Allerdings sind die Meßwerte nur eindimensional und liefern somit keine direkten Positionsangaben des Roboterwerkzeuges, sondern lediglich den Radius der Kugel, auf deren Oberfläche sich das Werkzeug befindet.

Kapitel 5

6D-Kalibrierung

5.1 Einleitung

Allgemein handelt es sich bei Parameterschätzverfahren um Methoden, mit deren Hilfe die aus einer physikalischen Modellierung gegebenen, aber unbekannten Parameter $\lambda_1, ..., \lambda_n$ mittels einer Reihe von Messungen bestimmt werden. Um den unvermeidbaren Meßfehlern Rechnung zu tragen, muß die Anzahl der Messungen bedeutend größer als die Zahl der Parameter sein. Das resultierende überbestimmte Gleichungssystem für die unbekannten Parameter ist in der Regel nicht exakt lösbar. Statt dessen verlangt man, daß die in den einzelnen Gleichungen auftretenden Abweichungen oder Residuen in einem noch zu präzisierenden Sinne minimal sind (Abschnitt 5.2).

Der Vorteil der 6D-Kalibrierung gegenüber Kalibrierungen niedriger Dimension liegt im höheren Informationsgehalt der einzelnen Messungen. Um ähnlich hohe Genauigkeiten bei nur drei- bzw. eindimensionalen Messungen zu erhalten, benötigt man die zwei- bzw. sechsfache Anzahl an Roboterposen.

Bei der 6D-Kalibrierung von Industrierobotern werden die benötigten Messungen üblicherweise mittels eines berührungslosen Meßsystems (Kamerasystem) abgenommen. Der Roboterflansch wird hierfür mit einem speziellen Meßwerkzeug ausgestattet (Abschnitt 5.4), das die Bestimmung von Position und Orientierung des TCPs zuläßt.

Von entscheidender Bedeutung für das numerische Lösungsverfahren ist die mathematische Darstellungsform von Position und Orientierung des Endeffektors. In der gängigen Literatur werden die Meßwerte in einem 6-dimensionalen Vektor zusammengefaßt, wobei die ersten drei Komponenten die Position und die letzten drei Komponenten die Orientierung in Form von Drehwinkel darstellen (Abschnitt 5.6.1).

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein funktionalanalytischer Weg beschritten. Statt Position und Orientierung gesondert zu behandeln, werden diese in einem Frame zusammengefaßt. Der Vergleich von Soll- und Ist-Frames führt auf die Formulierung eines Residuenoperators. Die Wahl einer speziellen Norm des Residuenoperators liefert ein geeignetes Zielfunktional für die Formulierung als Minimierungsproblem. (Abschnitt 5.2).

Die Lösung des nichtlinearen Minimierungsproblems erfolgt mittels einer Gauß-Newton-Iteration (Abschnitt 5.3). Hierbei kommt ausschließlich der Standard-Algorithmus zum Einsatz, der ganz ohne Skalierungen auskommt.

5.2 Minimierungsaufgabe

Zur Bestimmung des Parametervektors $\lambda = (\lambda_1, ..., \lambda_n)^T$ wird ein am Roboter angebrachtes Meßwerkzeug W an m unabhängigen Roboterposen ϑ_j von einem übergeordneten Meßsystem M vermessen.

Die resultierenden Meßwerte liegen in Form von Frames ${}^M_W T_j$ vor und werden mit den aus der Vorwärtskinematik (3.9) stammenden Frames ${}^0_n T_j(\lambda) := {}^0_n T(\vartheta_j, \lambda)$ auf eine noch zu präzisierende Weise verglichen.

Ziel ist es nun, den unbekannten Parametervektor λ so zu bestimmen, daß die beiden Frames für alle Posen ϑ_j, $1 \leq j \leq m$ jeweils möglichst gut übereinstimmen.

5.2.1 Basisnorm

Der Vergleich zweier Frames kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin, Frames als Abbildungen auf dem $\mathbb{R}^3$ zu betrachten und deren Bilder zu untersuchen. Sind nämlich für alle Punkte die Bilder unter zwei Frames gleich, müssen auch die Frames gleich sein. Das folgende Lemma beleuchtet diesen Sachverhalt näher und gibt Auskunft darüber, daß es ausreicht, die Bilder der Basisvektoren zu betrachten.

Lemma: Für zwei Frames T_1, T_2 sind folgende Aussagen äquivalent:

$$\begin{aligned}
&(i) && T_1 = T_2 \\
&(ii) && T_1 e_i = T_2 e_i, \quad 1 \leq i \leq 3 \\
&(iii) && \|(T_1 - T_2)e_i\|_2^2 = 0, \quad 1 \leq i \leq 3 \\
&(iv) && \|T_1 - T_2\|_e^2 := \textstyle\sum_{i=1}^3 \|(T_1 - T_2)e_i\|_2^2 = 0
\end{aligned}$$

Beweis: Die einzige Schwierigkeit beim Beweis des Lemmas besteht darin, $(ii) \Rightarrow (i)$ zu zeigen. Aus der Gleichheit der Bilder der Basisvektoren und aus der Tatsache, daß die Rotationen der beiden Abbildungen längen- und winkelerhaltend sind, folgt, daß die beiden Translationsanteile gleich sind. Dies läßt wiederum den Schluß zu, daß auch die Rotationsanteile gleich sein müssen.

Bemerkung: Obwohl die Normeigenschaft von $\|\cdot\|_e$ im weiteren nicht benötigt wird, handelt es sich hierbei tatsächlich um eine Norm auf dem Raum der affinen Abbildungen, die durch die Differenzen zweier Frames gebildet werden (Der Beweis erfolgt hauptsächlich über die Normeigenschaft der euklidschen Norm). Für eine affine Abbildung $Tx = Ax + t$ auf dem $\mathbb{R}^3$ ist

$$\|T\|_e = \|a_1 + t\| + \|a_2 + t\| + \|a_3 + t\|,$$

wobei mit a_i die Spalten der Matrix A bezeichnet wurden. Die Norm $\|\cdot\|_e$ entspricht also bis auf die konstanten Additionen mit dem Translationvektor t der sogenannten Frobeniusnorm.

5.2.2 Residuenoperator

Nachdem nun mit der Basisnorm $\|\cdot\|_e$ ein geeignetes Maß für die Übereinstimmung zweier Frames gefunden wurde, benötigt man für die Formulierung des Minimierungsproblems noch den Begriff des Residuenoperators.

Die affine Abbildung, definiert als Differenz aus Ist- und Soll-Frame der j-ten Pose, heißt Residuenoperator

$$R_j(\lambda) := {}^M_W T_j - {}^0_n T_j(\lambda). \tag{5.1}$$

Die Basisnorm des Residuenoperators liefert ein Maß für die Übereinstimmung von ${}^0_n T_j(\lambda)$ und ${}^M_W T_j$.

Gemäß des Gaußschen Ausgleichsprinzip werden nun die unbekannten Parameter $\lambda \in I\!R^n$ so bestimmt, daß die Summe der Quadrate der Residuen $\|R_j(\lambda)\|_e$ minimal ist:

$$\sum_{j=1}^{m} \|R_j(\lambda)\|_e^2 = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{3} \|R_j(\lambda)e_i\|^2 = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} (R_j(\lambda)e_i)_k^2 = \min \tag{5.2}$$

Gleichung (5.2) läßt sich als folgende Minimierungsaufgabe schreiben:

$$\text{Finde ein } \lambda \in I\!R^n \text{ mit} \quad F(\lambda) := \mathbf{r}(\lambda)^T\mathbf{r}(\lambda) = \min, \tag{5.3}$$

wobei der Residuenvektor $\mathbf{r}$ als

$$\mathbf{r} := (\mathbf{r}_j)_{1\le j\le m} \in I\!R^{9m} \tag{5.4}$$

$$\mathbf{r}_j := \Big(R_j(\lambda)e_i\Big)_{1\le i\le 3} \in I\!R^9 \tag{5.5}$$

definiert ist.

5.3 Gauss-Newton-Methode

Die notwendige Optimalitätsbedingung zur Lösung des nichtlinearen Minimierungsproblems (5.3) lautet:

$$\frac{\partial\, \mathbf{r}(\lambda)^T\mathbf{r}(\lambda)}{\partial \lambda_k} = 0, \quad 1 \le k \le n$$

Dies ergibt ein System von n nichtlinearen Gleichungen für die Unbekannten $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$, welches aber sehr mühsam zu lösen ist. Deshalb werden die nichtlinearen Residuenoperatoren $R_j(\lambda)$ zuerst linearisiert. Angenommen, für den gesuchten Vektor λ ist eine Näherungslösung $\lambda^{(0)}$ geeignet vorgegeben. Dann können über den Korrekturansatz

$$\lambda = \lambda^{(0)} + \zeta$$

die Residuenoperatoren gemäß

$$R_j(\lambda) = R_j(\lambda^{(0)} + \zeta) \doteq R_j(\lambda^{(0)}) + \nabla R_j(\lambda^{(0)})\zeta, \quad 1 \le j \le m\,, \tag{5.6}$$

in erster Näherung approximiert werden. Hierbei bezeichne $\nabla R_j(\lambda^{(0)})$ den Gradienten der Matrix $R_j(\lambda)$ an der Stelle $\lambda = \lambda^{(0)}$. Durch $\nabla R_j(\lambda^{(0)})\zeta$ wird der lineare Operator $I\!R^3 \to I\!R^3$ mit $x \mapsto \Big(\nabla\Big(R_j(\lambda^{(0)})x\Big)\Big)\zeta$ definiert. Wegen der Linearität des euklidschen Skalarprodukts und der Linearität der Gradientenbildung gilt:

$$\Big(\nabla R_j(\lambda^{(0)})\zeta\Big)x = \Big(\nabla R_j(\lambda^{(0)})x\Big)\zeta, \quad x \in I\!R^3, \zeta \in I\!R^n\,.$$

Setzt man die Approximation (5.6) in Gleichung (5.2) bzw. (5.3) ein, so erhält man ein linearisiertes Minimierungsproblem für den Korrekturvektor ζ, das sich in Matrixschreibweise wie folgt darstellt:

$$\tilde{F}(\zeta) := \mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0 + 2\mathbf{r}_0^T \mathbf{R}_0\, \zeta + \zeta^T \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_0\, \zeta = \min, \tag{5.7}$$

wobei $\mathbf{r}_0$ und $\mathbf{R}_0$ als

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0 &:= \mathbf{r}(\lambda^{(0)}) \\ \mathbf{R}_0 &:= \left(\mathbf{R}_j^{(0)}\right)_{1\le j\le m} \in I\!R^{9m\times n} \\ \mathbf{R}_j^{(0)} &:= \left(\nabla R_j(\lambda^{(0)}) e_i\right)_{1\le i\le 3} \in I\!R^{9\times n} \end{aligned} \tag{5.8}$$

definiert sind. Die Matrix $\mathbf{R}_0$ ist die Jacobi-Matrix der Funktionen $\|R_j(\lambda)\|_e^2$ an der Stelle $\lambda^{(0)}$.

Die notwendige Bedingung dafür, daß die quadratische Form (5.7) ein Minimum besitzt, besteht darin, daß ihr Gradient $\nabla\tilde{F}(\zeta)$ verschwindet. Dies bedeutet, daß die sogenannte Normalgleichung

$$\mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_0\, \zeta + \mathbf{R}_0^T \mathbf{r}_0 = 0 \tag{5.9}$$

erfüllt sein muß.

Hat die Matrix $\mathbf{R}_0$ maximalen Rang, d.h., ihre Spalten sind linear unabhängig, ist die symmetrische Matrix $\mathbf{R}_0^T\mathbf{R}_0$ positiv definit und die Lösbarkeit von (5.9) ist für die Existenz eines Minimums auch hinreichend. Die Lösung der Normalgleichung kann in diesem Fall nach den Methoden von Cholesky oder denen der Orthogonaltransformation erfolgen.

Der Korrekturvektor $\zeta^{(1)}$ als Lösung des linearisierten Minimierungsproblems (5.7) führt im allgemeinen nicht zur Lösung des nichtlinearen Minimierungsproblems (5.3). Vielmehr stellt der Vektor

$$\lambda^{(1)} := \lambda^{(0)} + \zeta^{(1)}$$

im günstigsten Fall eine bessere Näherung für den unbekannten Vektor λ dar, die iterativ weiter verbessert werden kann.

5.4 Maßkörperprinzip

In diesem Abschnitt wird der Frage nachgegangen, auf welche Weise die benötigten Frames ${}^M_W T_j$ durch Vermessung eines Meßwerkzeuges gewonnen werden können.

Mit dem Begriff Meßwerkzeug ist eine Vorrichtung gemeint, die am Roboterflansch angebracht wird und die mit einem Meßsystem derart vermessen werden kann, daß daraus die Position und Orientierung dieses Werkzeuges bezüglich eines Weltkoordinatensystems berechnet werden kann. In den meisten Fällen ist das Weltkoordinatensystem gleich dem internen Koordinatensystem des Meßsystems.

Eine einfache Möglichkeit, dies zu realisieren, ist ein Meßwerkzeug, bestehend aus einem starren Körper, das mit Targets in ausreichend großen Abständen zueinander versehen

Abbildung 5.1: Meßtafel

ist (siehe Abbildung 5.1). Aufgrund der vom Meßsystem ermittelten absoluten Raumpositionen der Targets, kann nun das Frame ${}^{M}_{W}T$ des Meßwerkzeuges ermittelt werden.

Grundsätzlich sind für dieses Verfahren drei Targets ausreichend. Zusätzliche Targets oder die Kenntnis der Targets im internen Koordinatensystem des Meßwerkzeuges tragen zur Verbesserung der Genauigkeit bei, mit der das Frame ${}^{M}_{W}T$ bestimmt werden kann.

Im folgenden werden die beiden Methoden beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit zur Kalibrierung von Robotern angewendet wurden:

5.4.1 Drei unbekannte Targets

Das Meßwerkzeug besteht aus drei festen Targets, die nicht auf einer gemeinsamen Geraden liegen. Das interne Koordinatensystem des Werkzeuges ist nicht bekannt. Eine Messung liefert die drei Positionsvektoren ${}^{M}x_1, {}^{M}x_2, {}^{M}x_3$ der Targets im Koordinatensystem M des Meßsystems. Dann liegen die drei Targets auf einer gemeinsamen Ebene, deren Richtungen durch die beiden Differenzenvektoren

$$\begin{aligned} {}^{M}x_{21} &:= {}^{M}x_2 - {}^{M}x_1 \\ {}^{M}x_{31} &:= {}^{M}x_3 - {}^{M}x_1 \end{aligned}$$

festgelegt sind. Mittels des Schmidtschen Orthogonalisierungsverfahren wird aus diesen Richtungen gemäß

$$\begin{aligned} {}^{M}z_1 &:= {}^{M}x_{21} \\ {}^{M}z_2 &:= {}^{M}x_{31} - \frac{({}^{M}x_{31}, {}^{M}z_1)}{({}^{M}z_1, {}^{M}z_1)} {}^{M}z_1 \\ {}^{M}z_3 &:= {}^{M}z_1 \times {}^{M}z_2 \end{aligned}$$

eine Orthogonalbasis $\{{}^Mz_1, {}^Mz_2, {}^Mz_3\}$ des $\mathbb{R}^3$ gewonnen. Nach Normierung der Basisvektoren auf die Länge 1 beschreibt das Frame

$$ {}^M_WT := \Big(\big({}^Mz_1, {}^Mz_2, {}^Mz_3 \big), {}^Mx_1 \Big) $$

die Transformation des Werkzeugkoordinatensystems, das die Targetebene als Koordinatenebene enthält und in ${}^Mx_1$ seinen Ursprung hat, in das Meßsystem.

5.4.2 Mindestens drei bekannte Targets

Bei dieser Methode werden auf dem Meßwerkzeug $k \geq 3$ Targets angebracht. Darüber hinaus sind die Positionen ${}^Wp_i, 1 \leq i \leq k$, der Targets in einem willkürlich festgelegten Werkzeugkoordinatensystem W bekannt. Üblicherweise werden diese Positionen durch hochpräzise Messungen mit einem übergeordneten Meßsystem unter Laborbedingungen gewonnen. Diese qualitativ sehr hochwertige Information kann nun während des Meßvorgangs dazu benutzt werden, die Güte der Messungen ${}^Mx_i, 1 \leq i \leq k$, zu überprüfen.

Über die Längen der Differenzenvektoren

$$ \begin{aligned} {}^Md_{ij} &:= \left\| {}^Mx_i - {}^Mx_j \right\| \\ {}^Wd_{ij} &:= \left\| {}^Wp_i - {}^Wp_j \right\| \end{aligned} $$

kann zu einem vorgegebenen $\varepsilon > 0$ folgendes Qualitätskriterium für die Güte der Messung angegeben werden:

$$ \text{Messung ist gut} \iff \left| {}^Md_{ij} - {}^Wd_{ij} \right| < \varepsilon \quad \text{für alle } 1 \leq i, j \leq k, i \neq j\,. \tag{5.10} $$

Das Kriterium (5.10) gewährleistet, daß alle Ist-Längen ${}^Md_{ij}$ weniger als eine vorgegebene Toleranz ε von ihren Soll-Längen ${}^Wd_{ij}$ abweichen. Wird das Kriterium verletzt, kann man entweder die Messung wiederholen oder die für die Überschreitung der Längendifferenz verantwortlichen Punkte aus den Meßdaten eliminieren.

Bleiben am Ende wenigstens drei gemessene Targets ${}^Mx_i$ übrig, die dem Qualitätskriterium (5.10) standhalten, können die Referenzkoordinaten ${}^Wp_i$ auch zur Berechnung des Werkzeugframes ${}^M_WT$ herangezogen werden. Gesucht ist ein Frame ${}^M_WT$, das im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate die Referenzkoordinaten ${}^Wp_i$ möglichst gut in die gemessenen Koordinaten ${}^Mx_i$ transformiert. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$ \text{Finde } \lambda \in \mathbb{R}^6 \text{ mit } \quad \sum_{i=1}^{k} \left\| {}^M_WT(\lambda)\, {}^Wp_i - {}^Mx_i \right\| = \min, \tag{5.11} $$

wobei ${}^M_WT(\lambda)$ durch die unbekannten Parameter $\lambda_1, \ldots, \lambda_6$ gemäß

$$ {}^M_WT := \Big({}^M_WR(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), {}^Mt(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6) \Big) $$

erzeugt wird. Die Lösung des Minimierungsproblems (5.11) erfolgt mit denselben Methoden, wie sie bereits in Abschnitt 5.3 vorgestellt wurden.

Die Vorteile dieses Verfahrens, die sich aus der Kenntnis der Referenzkoordinaten ergeben, sind unübersehbar. Einerseits können Ausreißer identifiziert und eliminiert werden, andererseits kann das Werkzeugframe aufgrund der Überbestimmtheit im Sinne einer besten Approximation berechnet werden.

5.5 Startiterierte

Wesentlich für die Konvergenz und Geschwindigkeit der Gauß-Newton-Methode ist die geeignete Wahl einer Startiterierten $\lambda^{(0)}$ für den unbekannten Parametervektor. Liegt diese nicht von Anfang an in einer Umgebung der gesuchten Lösung, ist eine Konvergenz des Verfahrens nicht zu erwarten. Für die Parameter des physikalischen Robotermodells ist die 0 eine gute Wahl für die Startwerte, da diese wenig von ihren kinematischen Vorgaben abweichen werden. Anders gestaltet es sich jedoch für die Transformationen der Roboterbasis, des Werkzeuges, beziehungsweise für das zuletzt vorgestellte Verfahren zur Generierung von Werkzeugframes. In diesen Fällen sind zunächst keine Schätzungen der jeweiligen Transformationen bekannt. In diesem Abschnitt wird nun ein allgemeines Verfahren vorgestellt, solche Schätzungen allein aus der Kenntnis von drei Messungen vorzunehmen. Anschließend wird dieses Verfahren auf die Anwendung der Roboterkalibrierung übertragen.

5.5.1 Framekonstruktion aus Bild und Urbild

Angenommen, die drei linear unabhängigen Ortsvektoren ${}^{A}x_i$, $1 \leq i \leq 3$, die bezüglich eines Koordinatensystems A gegeben sind, werden durch die unbekannte Koordinatentransformation ${}^{B}_{A}T$ auf die drei Punkte

$$ {}^{B}x_i = {}^{B}_{A}T \, {}^{A}x_i, \quad 1 \leq i \leq 3, $$

bezüglich eines Koordinatensystems B abgebildet. Dann läßt sich das unbekannte Frame ${}^{B}_{A}T$ allein durch Kenntnis der Urbilder und deren Bilder bestimmen. Wie in Abschnitt 5.4.1 beschrieben, definieren die Differenzenvektoren der Bilder und Urbilder jeweils eine (die gleiche) Ebene des $\mathbb{R}^3$ und können mittels des Schmidtschen Verfahrens orthonormalisiert werden. Die resultierenden Frames

$$ \begin{aligned} {}^{A}_{E}T &:= \left(\left({}^{A}z_1, {}^{A}z_2, {}^{A}z_3 \right), {}^{A}x_1 \right) \\ {}^{B}_{E}T &:= \left(\left({}^{B}z_1, {}^{B}z_2, {}^{B}z_3 \right), {}^{B}x_1 \right) \end{aligned} $$

beschreiben die Transformationen des Koordinatensystems E, das durch die Ebene konstruiert wurde, nach A bzw. nach B. Das gesuchte Frame ${}^{B}_{A}T$ ergibt sich somit zu

$$ {}^{B}_{A}T := {}^{B}_{E}T \, {}^{A}_{E}T^{-1} . \tag{5.12} $$

5.5.2 Schätzung der Roboterbasis bezüglich des Meßsystems

Angenommen, das Werkzeugframe ${}^{M}_{W}T$ ist aufgrund von Messungen der Targets bezüglich des Koordinatensystems M des Meßsystems bekannt und während der Messung lagen die Achswinkel $\vartheta \in \mathbb{R}^d$ am Roboter an. Dann läßt sich mittels des oben beschriebenen Verfahrens eine gute Schätzung für die unbekannte Transformation ${}^{M}_{R}T$ von der Roboterbasis in das Meßsystem angeben, indem auf das Werkzeugframe und die Transformationskette die drei Einheitsvektoren e_i gemäß

$$ {}^{M}_{W}T \, e_i = {}^{M}_{R}T \, {}^{R}_{W}T(\vartheta) \, e_i, \quad 1 \leq i \leq 3 \tag{5.13} $$

angewendet werden. Hierbei übernehmen ${}^{M}_{W}T \, e_i$ und ${}^{R}_{W}T(\vartheta) \, e_i$ die Rolle der ${}^{B}x_i$ und ${}^{A}x_i$.

5.5.3 Schätzung des Werkzeuges bezüglich des Roboterflanschs

In diesem Fall ist die Transformation der Roboterbasis in das Koordinatensystem des Meßsystems bekannt, und es soll eine Schätzung für die Transformation ${}^F_W T$ des Werkzeugs in das Koordinatensystem des Roboterflanschs ermittelt werden. Multipliziert man (5.13) von links mit $\left({}^M_F T(\vartheta)\right)^{-1}$, erhält man

$$ {}^F_W T\, e_i = \left({}^M_F T(\vartheta)\right)^{-1} {}^M_W T\, e_i. \tag{5.14} $$

Das beschriebene Schätzverfahren läßt sich nun ebenfalls anwenden, wobei diesmal e_i und die rechte Seite von (5.14) die Rolle der ${}^A x_i$ und ${}^B x_i$ übernehmen.

5.5.4 Schätzung des Werkzeuges bezüglich des Meßsystems

In Abschnitt 5.4.2 wird das Werkzeugframe ${}^M_W T$ bezüglich des Meßsystems mittels des Gaußschen Ausgleichsprinzips bestimmt. Hier kommt die Schätzmethode sogar in jeder Messung zur Anwendung, indem die Transformationsbeziehung zwischen den Referenzkoordinaten ${}^W p_i$ und den gemessenen Koordinaten ${}^M x_i$ hergestellt wird:

$$ {}^M x_i = {}^M_W T\, {}^W p_i\,. \tag{5.15} $$

5.6 Numerische Resultate

In diesem Abschnitt werden zunächst einige Fragen in Zusammenhang mit dem numerischen Lösungsverhalten bei der 6D-Kalibrierung erörtert. In Abschnitt 5.6.1 werden die Vorteile behandelt, die sich aus der Konstruktion des Zielfunktionals auf der Basis der Residuenoperatoren ergeben. Zentrales Thema in Abschnitt 5.6.2 ist die geeignete Wahl der Posen und die damit verbundene Kondition des Minimierungsproblems.

Abschnitt 5.6.3 befaßt sich mit der Meßgenauigkeit der im Rahmen dieser Arbeit bevorzugt eingesetzten Réseau-Scanning-Kamera. Schließlich werden in Abschnitt 5.6.4 die erreichten Genauigkeiten eines kalibrierten Roboters angegeben und mit denen einer unkalibrierten Kinematik verglichen. In Abschnitt 5.6.5 wird der empirische Nachweis erbracht, daß die Modellierung der Roboternachgiebigkeiten durch lineare Gelenkelastizitäten ausreichend ist. Es werden Werte präsentiert, die zeigen, daß die erreichten Genauigkeiten auch bei einer Variation der transportierten Nutzlast weitgehend konstant bleiben.

Zum Schluß wird in Abschnitt 5.6.6 detailiert beschrieben, welche Modellparameter für den Identifikationsprozeß maßgeblich sind und welchen Strukturelementen des Roboters sie zugeordnet sind.

5.6.1 Zielfunktional

Stehen 6-dimensionale Meßverfahren zur Verfügung, werden in der Literatur häufig Ansätze gewählt (vgl. u.a. [11]), in der die gemessene Endeffektorstellung als 6-dimensionaler Vektor x_j notiert wird. Diese Darstellungsweise führt auf die Formulierung

vektorieller Residuengleichungen der Art

$$r_j = x_j - f^{-1}\left({}^0_nT_j(\lambda)\right) \ . \tag{5.16}$$

Die Funktion f^{-1} bildet ein Frame auf ihre Erzeugende, nämlich Translationsvektor und Drehwinkel, gemäß Gleichung (3.7) ab.

Der Nachteil dieser Formulierung ist die unnötig hohe Komplexität. Bei der Linearisierung von (5.16) kann die Gradientenbildung kaum mehr analytisch erfolgen, sondern wird meistens mittels numerischer Methoden durchgeführt. Dies wirft allerdings wieder neue Schwierigkeiten auf. Insbesondere sind die auftretenden $atan2$-Funktionen nicht stetig differenzierbar. Somit wird die Verwendung einer Schrittweitensteuerung unumgänglich. Wählt man stattdessen eine Darstellung wie in (5.1) angegeben, können die einfachen analytischen Differentiale (3.8) benutzt werden, die zudem unendlich oft differenzierbar sind.

Ein weiterer Vorteil der Formulierung (5.1) und der Verwendung analytischer Differentiale ist die Robustheit und die hohe Konvergenzgeschwindigkeit des Gauß-Newton-Verfahrens. Während die meisten Autoren (siehe u.a. [11], [19]) eine Skalierung des Parametervektors λ für nötig halten, um die Größenunterschiede zwischen Längen und Winkeln auszugleichen, sowie modifizierte Algorithmen, wie das Levenberg-Marquardt-Verfahren (siehe [18]) einsetzen, kommt das hier eingesetzte Gauß-Newton-Verfahren, kombiniert mit einem einfachen Line-Search-Verfahren, ohne Skalierung aus. Zudem zeichnet es sich durch eine hohe Konvergenzgeschwindigkeit von durchschnittlich drei bis vier Iterationsschritten aus.

5.6.2 Konditionierung

Die Wahl der Posen sollte eine gute Beobachtbarkeit der Systemparameter liefern. Zur Quantifizierung der Beobachtungsgüte eignet sich die Konditionszahl der Normalgleichungsmatrix $\mathbf{R}_0^T\mathbf{R}_0$ aus Gleichung (5.9). Je näher die Konditionszahl an 1 liegt, desto besser ist das Problem konditioniert und desto genauer ist das Ergebnis der Parameterschätzung.

Umgekehrt ist das Problem schlecht konditioniert, falls mindestens ein Eigenwert der Normalgleichungsmatrix nahe oder gleich Null ist. In diesem Fall ist die Matrix $\mathbf{R}_0^T\mathbf{R}_0$ singulär und die Jakobimatrix $\mathbf{R}_0$ hat nicht maximalen Rang. Dies bedeutet, daß mindestens ein Parameter aufgrund der gewählten Posen nicht beobachtbar ist.

Um dies zu vermeiden, muß entweder die Menge der Posen geändert werden oder gewisse Parameter, die zur linearen Abhängigkeit führten, eliminiert werden. Allerdings ist die Vermeidung von linearen Abhängigkeiten allein über die Wahl der Posen nicht zu bewerkstelligen. So ist zum Beispiel bei einem Manipulator mit 6 revolutorischen Achsen der Abstand von Achse 4 zu Achse 3 nicht getrennt von dem Abstand Achse 5 zu Achse 4 identifizierbar, unabhängig davon, welche Posen gewählt wurden.

Um lineare Abhängigkeiten zu erkennen und um der möglicherweise schlechten Kondition der Normalgleichung zu begegnen, schlagen viele Autoren eine Singulärwertzerlegung als Lösungsstrategie vor. Da nach Schwarz (vgl. [23], S. 319) die Singulärwerte die Quadratwurzeln der Eigenwerte der Normalgleichungsmatrix sind, liefert der minimale Singulärwert ebenfalls ein adäquates Maß für die Kondition des Problems. Parameter, die

zu sehr kleinen Singulärwerten führen, werden eliminiert. Insgesamt liefert auch die Singulärwertzerlegung keine neuen Erkenntnisse, welche Roboterposen für die Kalibration zu wählen sind. Bestenfalls können aus einer vorgegebenen Menge von Posen diejenigen ausgewählt werden, die am besten für die Beobachtung der Parameter geeignet sind. Andererseits rechtfertigt allein das Auffinden und anschließende Eliminieren von linearen Abhängigkeiten nicht die Verwendung eines so aufwendigen numerischen Verfahrens wie die Singulärwertzerlegung.

Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein direkterer und somit einfacherer Zugang gewählt. Zunächst werden die Roboterposen durch äquidistante Diskretisierung des Achsraumes bestimmt. Dann wird einmalig die Menge der Parameter anhand dieser Posen festgelegt. Ausgehend von einer maximalen Modellierung, bei der zunächst sämtliche Parameter zugelassen sind, werden einzelne Parameter solange eliminiert, bis die Jakobimatrix nicht mehr singulär ist. Als Löser der entstehenden linearisierten Gleichungssysteme wird eine gewöhnliche Cholesky-Zerlegung LL^T verwendet. Als Kriterium für lineare Abhängigkeiten dienen hier, ganz ähnlich wie bei der Singulärwertzerlegung, die Diagonalelemente der oberen Dreiecksmatrix L, die sämtlich positiv sein müssen. Mit etwas Geschick erreicht man auf diese Weise ein gut konditioniertes Problem mit einer ausreichen hohen Anzahl von freien Parametern. Zum Beispiel beträgt die Kondition der Normalgleichung bei 42 Parametern, die auf diese Weise gewählt wurden, $5.8 \cdot 10^7$. Keineswegs eine beängstigend hohe Zahl, so daß man einem Cholesky-Verfahren bei doppelter Gleitkomma-Arithmetik durchaus Ergebnisse mit ausreichend hoher Genauigkeit zutrauen darf.

In der Praxis hat sich gezeigt, daß bei einer Posenwahl, die den zur Verfügung stehenden Achsraum möglichst gut überdeckt, sich die Konditionszahlen unterschiedlicher Achsräume und verschiedener Diskretisierungstiefen kaum unterscheiden. Anders ausgedrückt bedeutet dies: Solange nur genügend viele verschiedene Posen für die Identifikation zur Verfügung stehen, kann man mit der à priori getroffenen Wahl von Parametern auch gute Ergebnisse erwarten.

5.6.3 Meßgenauigkeit

Die Option „Positioniergenau“ erstreckt sich auf sämtliche Robotertypen. Angefangen mit dem kleinen 6kg-Roboter, bis hin zum 350kg-Schwerlastroboter, sind sämtliche Gewichtsklassen und Kinematiken mit dieser Option zu beziehen.

Ein sogenannter Posengenerator erzeugt für sämtliche Kinematiken eine ausreichend große, aber minimale Menge an sichtbaren und kollisionsfreien Posen. Auf diese Weise werden jeweils etwa 70 Meßposen generiert, in denen die Kinematiken im räumlichen Vorwärtsschnitt von zwei Réseau-Scanning-Kameras vermessen werden (siehe Abbildung 5.2).

Damit die Elastizitätseffekte möglichst gut beobachtbar sind, bewegt der Roboter während des gesamten Meßvorgangs seine maximale Nutzlast in Form einer aufgebrachten Hantel.

Der Überbestimmtheit und der Qualitätskontrolle jeder einzelnen Messung wird dadurch Rechnung getragen, daß in jeder Pose jeweils fünf Punkte auf der angebrachten Meßtafel gemessen werden. Wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben, werden Meßwerte genau dann

Abbildung 5.2: Absolutvermessung

eliminiert, falls deren Ist-Längen um mehr als 0.25 mm von ihren bekannten Soll-Längen abweichen. Das Histogramm 5.3 veranschaulicht die verbleibenden mittleren Längenabweichungen über 69 Posen. Hierbei wurden diejenigen Punkte, die jenseits des Qualitätskriteriums lagen, bereits eliminiert. Setzt man die Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Längen mit der Meßunsicherheit der Réseau-Scanning-Kameras gleich, so erhält man einen mittleren Meßfehler von ca. 0.085 mm pro Meßpunkt und einen maximalen Meßfehler von weniger als 0.25 mm. In Anbetracht dessen, daß sich jede der beiden Kameras, je nach Position des Roboters, zwischen 2 und 6 Meter von den Meßmerkmalen entfernt befinden, weist das Meßsystem eine vergleichsweise hohe Meßgenauigkeit auf.

Die auf Abbildung 5.2 sichtbaren Gummischürzen dienen lediglich dazu, den Einfluß von Fremdlicht während der Messung so gering wie möglich zu halten.

5.6.4 Posegenauigkeit

Zur Verifikation der mathematischen Modellierung und der Parameteridentifikation wurde ein 150kg-Roboter an 103 äquidistant diskretisierten Posen mit einer Nutzlast von 172kg vermessen. Für die Parameteridentifikation wurden allerdings nur 80 Posen verwendet, so daß für die Verifikation 23 unabhängige Posen zur Verfügung standen.

Zur Angabe von Posegenauigkeiten, bestehend aus Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit, muß zunächst noch ein geeignetes Maß gefunden werden. Dieses Maß muß insbesondere den Orientierungsfehlern Rechnung tragen. Da die Angabe von Orientierungsfehlern in Grad oder Winkelsekunden sehr unanschaulich ist, wurde hier die euklidsche Norm des Residuenoperators (5.1) gewählt. Durch die Anwendung von Testvektoren t_k auf die Residuenoperatoren erhält man eine praxisnahe Veranschaulichung der Posegenauigkeit:

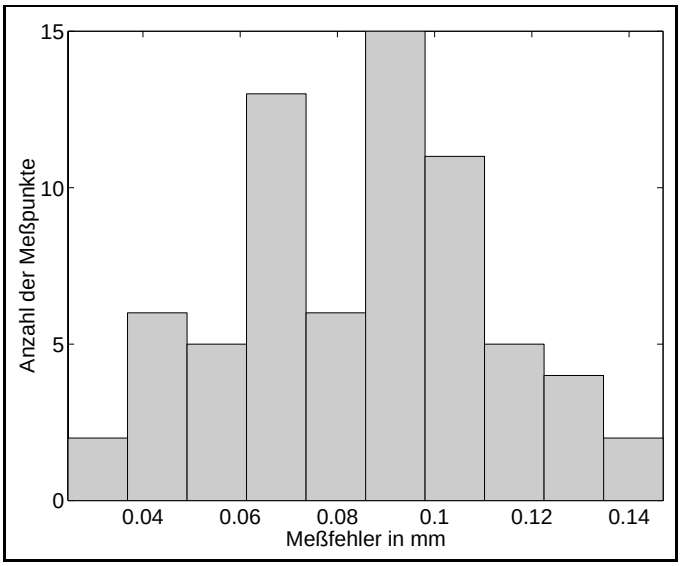


Abbildung 5.3: Mittlere Längenmeßabweichung der Réseau-Scanning-Kamera

„Wie hoch ist die Positioniergenauigkeit des Roboters unter Verwendung eines Werkzeuges t_k der Länge $\|t_k\|$?“

Es wurden drei verschiedene Testvektoren zur Veranschaulichung der Posefehler gewählt:

$$t_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad t_2 = \begin{pmatrix} 200 \\ 200 \\ 400 \end{pmatrix}, \quad t_3 = \begin{pmatrix} 400 \\ 400 \\ 800 \end{pmatrix}$$

Der Vektor t_1 repräsentiert die Positioniergenauigkeit am Roboterflansch, also die Genauigkeit des Roboters ohne Werkzeug. Die Orientierungsfehler bleiben in diesem Fall unberücksichtigt. Die Vektoren t_2 und t_3 simulieren Werkzeuge mit der ungefähren Länge von 500 mm und 1000 mm, wobei die Z-Ausdehnungen doppelt so groß wie die X- und Y-Längen sind. Dies entspricht in etwa den Dimensionen von handelsüblichen Schweißzangen.

Aus den längenabhängigen Positionierungsfehlern

$$\varepsilon_j^k := \left\| \left({}^M_W T_j - {}^0_n T_j(\lambda) \right) t_k \right\|, \quad k = 1, 2, 3$$

ergeben sich die statistisch relevanten Größen

$$\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}^k &:= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^k \\
\varepsilon_{\min}^k &:= \min_{1 \le j \le m} \{\varepsilon_j^k\} \\
\varepsilon_{\max}^k &:= \max_{1 \le j \le m} \{\varepsilon_j^k\} \\
\sigma^k &:= \frac{1}{m-1} \sqrt{\sum_{j=1}^{m} (\bar{\varepsilon}^k - \varepsilon_j^k)^2}
\end{aligned}$$

	0 mm		500 mm		1000 mm	
	kal	unkal	kal	unkal	kal	unkal
$\bar{\varepsilon}$	0.4437	2.9783	0.5115	3.1180	0.6952	3.8201
$\varepsilon_{\min}$	0.1919	1.1889	0.1961	1.0404	0.2164	1.0688
$\varepsilon_{\max}$	0.9686	5.0511	0.7967	5.4734	1.2242	8.5707
σ	0.1813	1.0738	0.1800	0.9868	0.2795	1.6884

Tabelle 5.1: Posegenauigkeit des kalibrierten/unkalibrierten Roboters

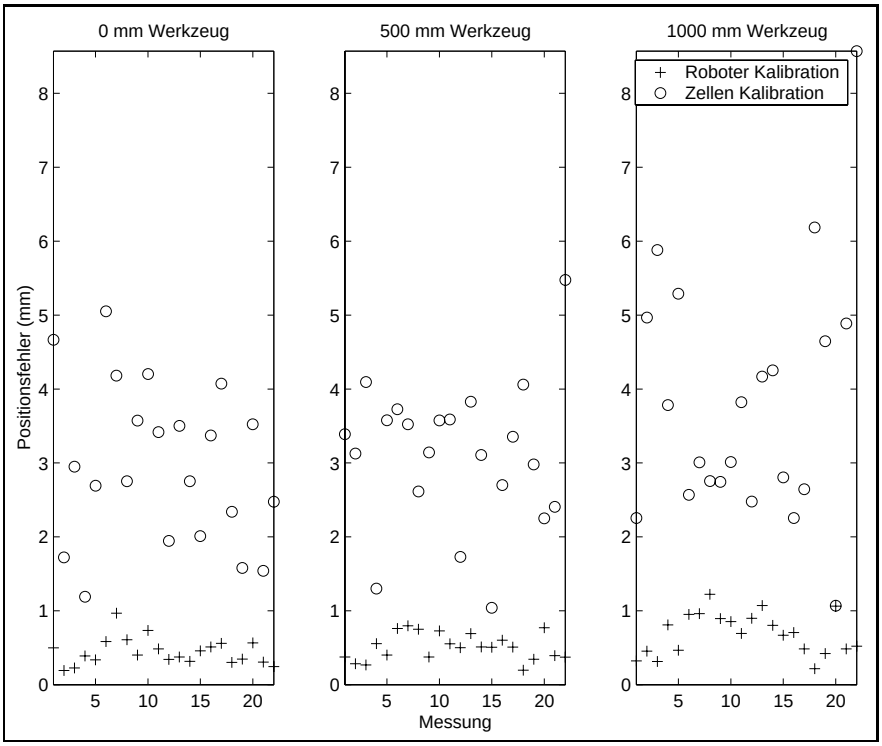


Abbildung 5.4: Genauigkeiten von Roboter- und Zellenkalibrierung

mittlerer, minimaler und maximaler Positionierfehler und deren Standardabweichung.

Nachdem nun ein geeignetes Maß für die Posegenauigkeit gefunden wurde, kann der Vergleich zwischen kalibrierter und unkalibrierter Kinematik erfolgen. Ein Problem stellt hierbei der Standpunkt der Kamera dar. Die als Worldframe bezeichnete Transformation vom Roboterfußpunkt in das Kamerakoordinatensystem wird zusammen mit den übrigen Roboterparametern während der Parameterschätzung bestimmt. Damit ein direkter Vergleich mit dem unkalibrierten Roboter möglich wird, muß auch hierfür das Worldframe im Sinne einer besten Approximation geschätzt werden. Allerdings wird in diesem Fall kein parametrisiertes Robotermodell, sondern die nominelle Kinematik benutzt. Auf diese Weise erreicht man das bestmögliche Ergebnis, das mit unkalibrierten Robotern zu erreichen ist. Der Vorgang des Einmessens in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem wurde unter dem Namen Zellenkalibrierung in Abschnitt 2.3 bereits behandelt.

In Abbildung 5.4 und Tabelle 5.1 sind die Posegenauigkeiten einer kalibrierten und einer

unkalibrierten Kinematik für 23 unabhängige Posen und für drei verschiedene Werkzeuglängen aufgetragen.

Die Genauigkeitsverbesserung, die durch die kalibrierte Kinematik erreicht wird, ist offenbar enorm. Im Schnitt erreicht man für alle drei Werkzeuglängen eine Verbesserung der Positioniergenauigkeit um das 6 bis 7-fache. Insbesondere läßt sich der maximale Fehler von über 8 mm auf 1.2 mm reduzieren.

Daß es sich bei der Verbesserung der Positioniergenauigkeiten um keinen Einzelfall handelt und sie auch auf andere Robotertypen übertragbar ist, soll mit Abbildung 5.5 illustriert werden. Hier werden die mittleren Positioniergenauigkeiten am Roboterflansch (Werkzeuglänge = 0) für Roboter mit Traglasten von 150kg, 125kg und 15kg grafisch dargestellt. Der mittlere Fehler beträgt bei den 150kg-Robotern in etwa 0.32 mm. Dieser Wert liegt um ca. einen Zehntel Millimeter unter dem Wert, der in Tabelle 5.1 exemplarisch für die Genauigkeit dieses Typs angegeben ist. Der Grund hierfür liegt darin, daß zur Erzeugung der Grafiken keine unabhängigen Verifikationsposen gewählt wurden. Es wurden dieselben Posen, die zur Kalibrierung benutzt wurden, auch zur Verifikation herangezogen. Schließlich legt der Vergleich der Werte den Schluß nahe, daß die Positioniergenauigkeiten für kleinere Roboter beziehungsweise für Roboter, die für kleinere Nutzlasten ausgelegt sind, zunehmen.

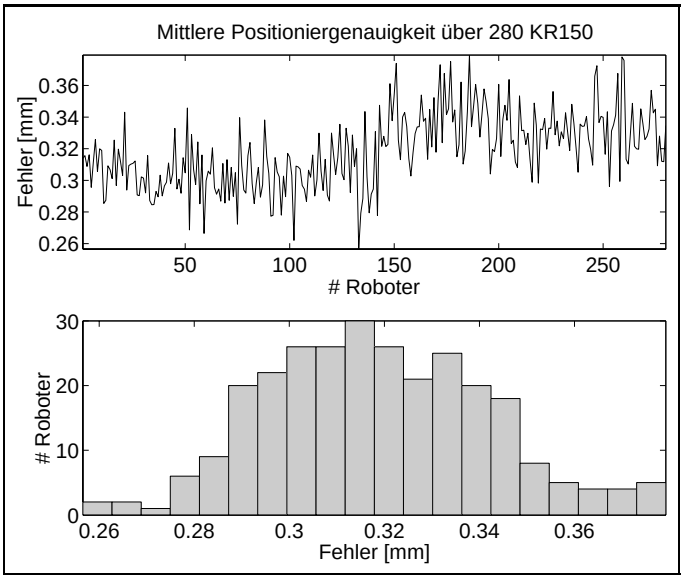
5.6.5 Masseunabhängigkeit

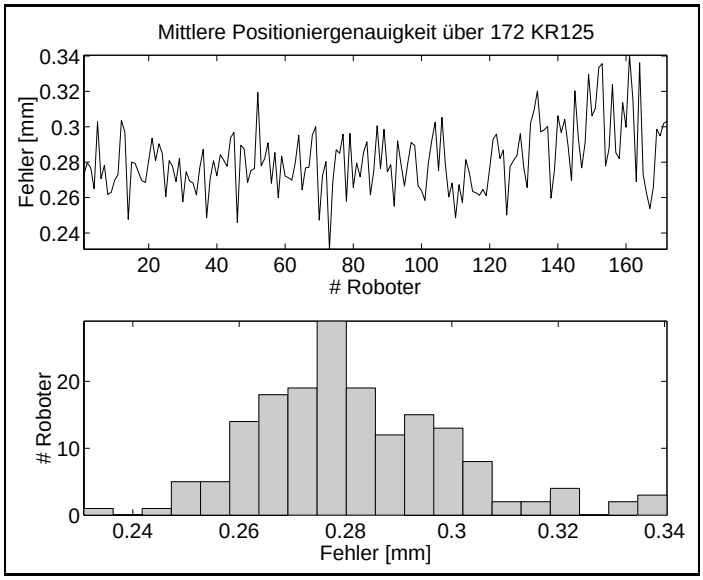
Im vergangenen Abschnitt wurde der Nachweis erbracht, daß die gewählte Modellierung bei entsprechender Quantifizierung der freien Parameter die Vorwärtskinematik des realen Roboters sehr exakt wiedergibt. Allerdings wurde für die Verifikation dasselbe Gewicht wie bei der Kalibration benutzt.

In diesem Abschnitt soll nun gezeigt werden, daß die Modellierung von masseabhängigen Verformungen durch lineare Gelenkelastizitäten ausreichend ist und die Verifikation für andere Massen somit ähnlich gute Resultate liefert. Zugleich wird an dieser Stelle der empirische Nachweis erbracht, daß der in Abschnitt 3.6.2 beschriebene Algorithmus zur Kompensation von Positionierungsfehlern keine signifikante Verschlechterung der Meßergebnisse bringt.

Hierzu wurde das über die Parameteridentifikation errechnete Modell in die Robotersteuerung geladen. Da die Fehlerkompensation nur im kartesischen Raum wirksam wird, wurde ein Roboterprogramm erzeugt, das die 23 Verifikationsposen in Form von kartesischen Positionen enthält. Dieses wurde durch Vorwärtstransformation über die nominelle Kinematik bei bekannten World- und Toolframe berechnet. Anschließend wurde der Roboter viermal mit unterschiedlichen Nutzlasten vermessen, indem vor jeder Vermessung einige Gewichtsscheiben der Hantel demontiert wurden. Die dadurch entstehenden Massen und Schwerpunkte wurden jedesmal in der Robotersteuerung eingegeben, so daß in der Kompensation die Berechnung der tatsächlichen Drehmomente korrekt erfolgen konnte. Die Ergebnisse dieser vier Meßreihen sind in Tabelle 5.2 zusammengefaßt.

Offenbar liefert die Kompensation, bestehend aus einer Approximation der modifizierten Rückwärtskinematik, keine meßbare Verschlechterung der Positioniergenauigkeit. Dieser Schluß liegt nahe, da die Ergebnisse der tatsächlichen (Tabelle 5.2, Spalte 1) vergleichbar mit denen der vorausgesagten Positioniergenauigkeit (Tabelle 5.1, Spalte 1) sind. Aus





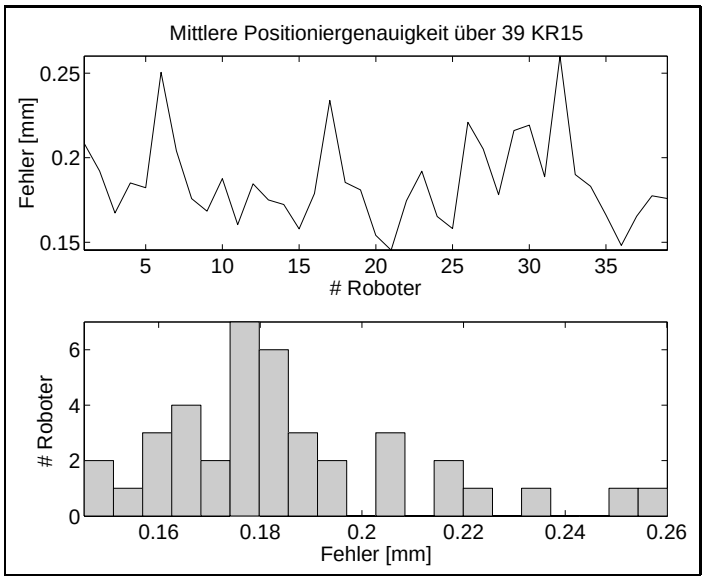


Abbildung 5.5: Mittlere Positioniergenauigkeiten verschiedener Robotertypen

	172kg	124kg	84kg	33kg
$\bar{\varepsilon}$	0.397	0.407	0.499	0.496
$\varepsilon_{\min}$	0.062	0.119	0.166	0.125
$\varepsilon_{\max}$	1.043	0.932	0.996	1.194
σ	0.236	0.228	0.205	0.224

Tabelle 5.2: Positioniergenauigkeit unter verschiedenen Massen

Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur die Werte für ein Werkzeug der Länge 0 verglichen.

Die zweite zentrale Aussage dieses Abschnitts ist, daß die Positioniergenauigkeit des Roboters weitgehennd unabhängig von der transportierten Nutzlast ist. In Tabelle 5.2, Spalte 2 - 4, sind die gemessenenen Genauigkeiten für Massesprünge von ca. 50 kg angegeben. Es ist zwar eine leichte Verschlechterung der mittleren Genauigkeit zu beobachten, diese ist jedoch mit 0.1 mm sehr gering und möglicherweise darauf zurückzuführen, daß der Grundfehler von 0.4 mm, im Falle „Verifikationsgewicht ist gleich Vermessungsgewicht“, ohnehin sehr gering ist. Die übrigen Angaben, wie minimaler, maximaler Fehler und Standardabweichung, sind dagegen fast identisch.

5.6.6 Parameterwahl

In diesem Abschnitt werden die 30 Modellparameter beschrieben, die zur Identifikation der erweiterten Roboterkinematik gewählt wurden. Modelliert wurden geometrische Abweichungen, bestehend aus Längen-, Winkel- und Nullagenfehlern, sowie lineare Elastizitätskoeffizienten als einzige nicht geometrische Phänome.

Wie bereits erwähnt, wurde auf der Basis einer äquidistanten Diskretisierung des 6-dimensionalen Achsraums der zu identifizierende Parametersatz einmalig festgelegt und im wesentlichen für sämtliche Roboterkalibrierungen eingesetzt. Solange die Roboter von der gleichen Bauart sind, ist eine Übertragung des Parametersatzes auf andere Robotertypen problemlos möglich. Hierfür müssen nur die roboterspezifischen Daten, wie Längen, Massen und Schwerpunkte der einzelnen Strukturelemente, angepaßt werden.

Eine Besonderheit der hier verwendeten Modellierung ist, daß die rotatorischen Freiheitsgrade (Winkel und Elastizitäten) nicht zwingend in Richtung der beweglichen Achse wirken müssen. Dasselbe gilt für die translatorischen Freiheitsgrade, die nicht auschließlich an die Längenausdehnung des jeweiligen Strukturelements gebunden sind. Sie können vielmehr jedem der 6 Transformationsparameter einer Achse zugeordnet werden.

In Tabelle 5.4 sind zu jeder Achse die identifizierbaren Parameter zusammen mit ihrer Wirkungsweise und ihrem Typ angegeben. Zusammen mit der Darstellung der Transformationskette aus Abbildung 3.5 und den Erläuterungen aus Tabelle 5.3 ist die verwendete kinematische Modellierung erschöpfend behandelt. Auf der Basis dieser Modellierung wurden im Laufe dieser Arbeit weit über 1000 Industrieroboter kalibriert, wobei die beschriebenen 30 kinematischen Parameter bei jeder Kalibrierung individuell bestimmt

Nullage	Konstanter Nullagenfehler in Drehrichtung einer rotatorischen Achse
Winkel	Konstanter Winkelfehler senkrecht zur Drehrichtung
Gelenk	Getriebenachgiebigkeit in Drehrichtung einer rotatorischen Achse
Struktur	Nachgiebigkeit einer Achse senkrecht zur Drehrichtung
Länge	Ausdehnung eines Strukturelements
Verschiebung	Verschiebung des Gelenkursprungs

Tabelle 5.3: Parameterwahl

worden sind. Ein kleiner Ausschnitt aus dem gewonnen Datenmaterial kann in Anhang B gefunden werden.

5.7 Anwendungen

Zum Abschluß dieses Kapitels werden einige industrielle Anwendungen der 6D-Kalibrierung vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Bereits bei der Herstellung von Industrierobotern wurde die 6D-Kalibrierung eingesetzt. Nachdem alle Roboterkomponenten zusammengefügt worden sind, wird der Roboter vermessen und eine Referenzstellung der einzelnen Achsen durch Kalibrierung festgelegt. Dieser Vorgang wird einmalig durchgeführt und dient dazu, die sogenannte Roboterjustage (siehe 5.7.1) mit einfachen Hilfsmitteln zu ermöglichen.

Durch die Kalibrierung des verfeinerten kinematischen Robotermodells und die Kompensation der Roboterfehler in der Steuerung erhält man den sogenannten „Positioniergenauen Roboter“. Die Einsatzgebiete dieses Roboters, die in Abschnitt 5.7.2 beschrieben werden, reichen von der klassischen Offline-Programmierung über die Roboterführung durch Sensoren und die Austauschbarkeit von Industrierobotern bis hin zu Anwendungen, die eine hohe Unabhängigkeit von der transportierten Nutzlast voraussetzen.

5.7.1 Roboterjustage

Mit der Roboterjustage ist das Ziel verbunden, die Beziehung zwischen Encoder-Signal und tatsächlicher Stellung einer Roboterachse zu bestimmen. Die Justage dient zur Festlegung einer Referenz- oder Home-Position. Hierbei wird jede Achse so lange bewegt, bis ein Nulldurchgang der Achse gemessen wird. Sämtliche Encoder-Werte werden dann relativ zu dieser Referenzstellung angegeben.

Unterschiedliche Roboterhersteller benutzen auch unterschiedliche Methoden zur Roboterjustage.

- Mastering: Der Roboter fährt eine Referenzposition am Roboterfuß an (Fanuc)
- Antastung einer mechanischen Referenzmarke an jeder Achse (Kuka)
- Benutzung von Ausrichtungsinstrumenten, z.B. Wasserwaage (ABB)

Achse	Parameter	Typ	Achse	Parameter	Typ
Achse 1	Drehung um X	Winkel	Achse 4	Elastizität um X	Gelenk
	Elastizität um X	Struktur		Elastizität um Y	Struktur
	Elastizität um Y	Struktur		Drehung um Z	Winkel
Achse 2	Drehung um X	Winkel		Abstand in X	Länge
	Elastizität um Y	Gelenk		Abstand in Z	Länge
	Drehung um Y	Nullage	Achse 5	Elastizität um Y	Gelenk
	Drehung um Z	Winkel		Drehung um Y	Nullage
	Abstand X	Länge		Drehung um Z	Winkel
Achse 3	Drehung um X	Winkel		Elastizität um Z	Struktur
	Elastizität um X	Struktur		Abstand in Y	Verschiebung
	Elastizität um Y	Gelenk		Abstand in Z	Verschiebung
	Drehung um Y	Nullage	Achse 6	Elastizität um X	Gelenk
	Drehung um Z	Winkel		Elastizität um Y	Struktur
	Abstand in X	Länge		Drehung um Y	Winkel
				Elastizität um Z	Struktur
				Drehung um Z	Winkel

Tabelle 5.4: Identifizierte Parameter

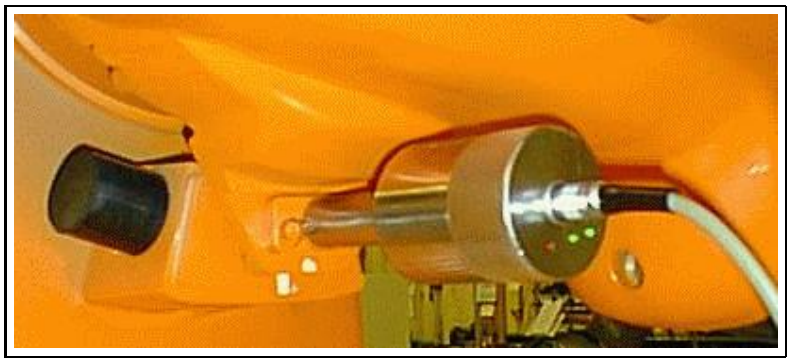


Abbildung 5.6: Elektronischer Meßtaster (EMT)

- Benutzung von Referenzkörpern zwischen den Links (Cincinnati)

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich das von Kuka angewandte Verfahren zur Antastung einer mechanischen Referenzmarke untersucht. Zur Justage einer Achse i wird auf den zugehörigen Link ein sogenannter elektronischer Meßtaster (EMT) aufgeschraubt (siehe Abb. 5.6). Auf dem vorherigen Link $i-1$ befindet sich das Gegenstück zu dem Taster, eine sogenannte Justagekerbe. Die Achse wird nun solange bewegt, bis der Taster maximal in die Kerbe eintaucht. Dieser Maximalwert wird mit dem Nulldurchgang der Achse identifiziert, indem der Zähler des relativ messenden Encoders auf Null gesetzt wird. Wird dieses Verfahren für alle Achsen wiederholt, kann die mechanische Nullstellung des Roboters jederzeit wiederhergestellt werden.

Zur Funktionstüchtigkeit des Verfahrens wird allerdings vorausgesetzt, daß das Pärchen Kerbe und Taster so angebracht sind, daß deren Aufeinandertreffen tatsächlich die gewünschte Nullstellung definiert. Im Rahmen der Roboterfertigung wird diese Referenzstellung bei allen Robotern mittels einer statischen TCP-Vermessung ermittelt (siehe Abb. 5.7).

Hierfür wird eine am Roboterflansch angebrachte Meßtafel W durch eine Réseau-Scanning-Kamera vermessen. Wurde die Kamera in die Roboterbasis R zuvor eingemessen, so kann über einen räumlichen Rückwärtsschnitt die Position und Orientierung der Tafel ${}^R_W T$ bezüglich der Roboterbasis gewonnen werden. Ist zudem das Toolframe ${}^F_W T$, das die Beziehung zwischen Meßtafel und Roboterflansch wiedergibt, bekannt, liefert die Gleichung

$$ {}^R_W T = {}^R_F T(\vartheta)\, {}^F_W T \tag{5.17} $$

den Ansatz zur Bestimmung der unbekannten Achswinkel ϑ, die zum Zeitpunkt der Vermessung am Roboter ${}^R_F T(\vartheta)$ anlagen.

Zur Lösung der Gleichung (5.17) sind prinzipiell zwei Möglichkeiten denkbar:

Single-Pose-Vermessung

Der Roboter wird in nur einer Pose vermessen. Die gesuchten Achswinkel ϑ ergeben sich aus der inversen Kinematik von ${}^R_W T(\vartheta)$. Damit der Einfluß von Gelenklosen begrenzt bleibt, kann man diese eine Justagepose aus positiver und negativer Richtung anfahren und vermessen. Die gesuchten Achswinkel werden dann aus dem Mittelwert der beiden Rückwärtstransformationen gebildet.

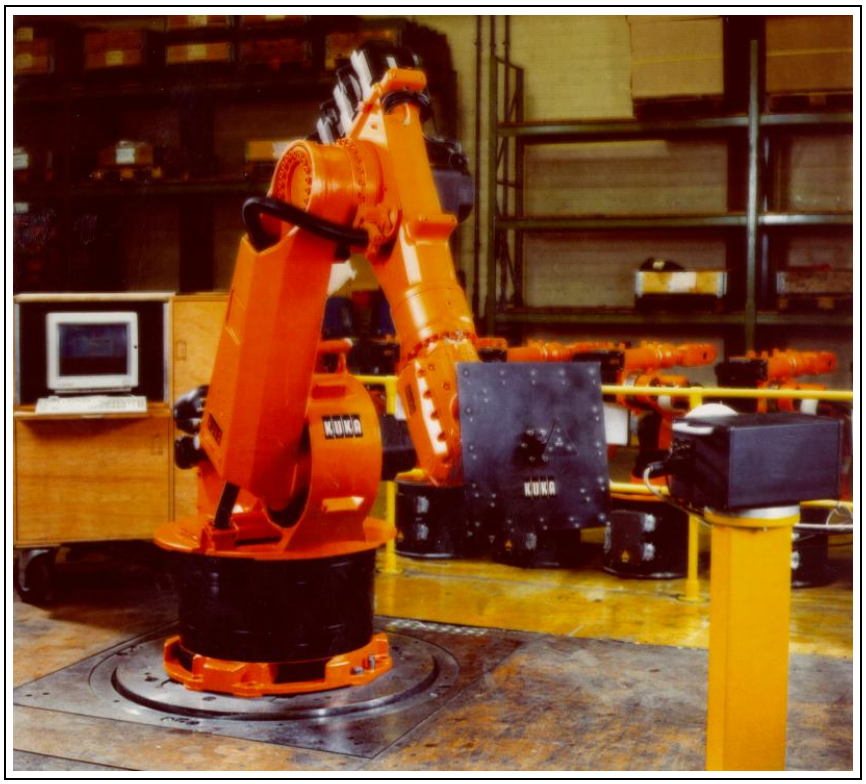


Abbildung 5.7: Roboterjustage

Multi-Pose-Vermessung

Der Nachteil der Single-Pose-Vermessung liegt darin, daß trotz der beiden Messungen nur eine Roboterpose in das Verfahren Eingang findet. Im Gegensatz dazu wird der Roboter bei der Multi-Pose-Vermessung in mehreren, im Sichtbarkeitsbereich der Kamera liegenden Posen vermessen.

Durch eine grobe Vorjustage des Roboters erhält man Näherungswerte ϑ_j^0 für die tatsächlich anliegenden Achswinkel ϑ_j. Messungen des Endeffektors liefern dazu korrespondierende Frames ${}^R_W T_j$. Setzt man den Korrekturansatz

$$\vartheta_j = \vartheta_j^0 + \Delta\vartheta$$

für die tatsächlichen Achswinkel ϑ_j in Gleichung (5.17) ein, kann man den Achsoffset $\Delta\vartheta$ als Lösung eines globalen Minimierungsproblems über alle Posen gewinnen. Damit lassen sich gegenüber dem Single-Pose-Verfahren höhere Genauigkeiten erzielen.

5.7.2 Positioniergenauer Roboter

Offline Programmierung

Wie in dieser Arbeit bereits mehrfach erwähnt wurde, ist die Roboter- und Zellenkalibration notwendige Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz von OLP. Nur durch die Kalibration sämtlicher an dem Fertigungsprozeß beteiligter Komponenten, wie Roboter, Werkzeug, Bauteil, Zusatzachsen und Peripherie, kann garantiert werden, daß die offline erstellten Roboterprogramme problemlos in der realen Fertigungsumgebung eingesetzt

werden können. Problemlos bedeutet in diesem Zusammenhang, daß die Robotertrajektorien nachträglich nicht mehr angepaßt werden müssen, da sie einerseits frei von Kollisionen sind, doch andererseits eine ausreichend hohe Prozeßgenauigkeit gewährleisten.

Roboterführung

Immer häufiger werden in der industriellen Fertigung Sensoren eingesetzt, mit deren Hilfe die Lage von Bauteilen kurz vor deren eigentlichen Bearbeitung bestimmt wird. So ist beispielsweise im Automobilbau das Einpassen von Türen, Klappen und Scheiben von Sensorik geführt und gehört schon lange zum anerkannten Stand der Technik. Das Anwendungsgebiet der Roboterführung ist allerdings prinzipiell unbegrenzt und hält auch in immer neue Bereiche Einzug.

Obwohl es sich bei der Roboterführung nicht um die klassische OLP handelt, gibt es jedoch eine entscheidende Gemeinsamkeit: Die Robotertrajektorie wird nicht über das Teach-In-Verfahren festgelegt. Die Zielpositionen des bearbeitenden Manipulators werden bei der Roboterführung aufgrund der Meßergebnisse jedesmal neu berechnet. Sind die Anforderungen an die Qualität des Produktes nur genügend hoch, erfordert dies den Einsatz von kalibrierten Industrierobotern.

An dieser Stelle sei erwähnt, daß es in den letzten Jahren die Bestrebung gibt, die Sensorik selbst am Roboter zu führen. Diese Methodik erfordert neben der kinematischen Kalibrierung auch eine Kompensation von Temperatureinflüssen (siehe Kapitel 6).

Austauschbarkeit

Ist eine Robotertrajektorie erst einmal festgelegt und hat sich diese im Fertigungsprozeß auch bewährt, bleibt diese in der Regel auch unverändert. Im Fahrzeugbau werden bestimmte Modelle sogar jahrelang nahezu unverändert produziert. Hin und wieder kommt es in Einzelfällen aber zu einem durch Verschleiß oder durch Crash bedingten Austausch von Robotern. Um die Stillstandszeiten der Anlage so gering wie möglich zu halten, ist es notwendig, daß der eingewechselte Roboter die Trajektorie ohne größere Abweichungen zu seinem Vorgänger abfahren kann.

Um dies zu gewährleisten werden entweder generell absolut genaue Roboter eingesetzt oder die Roboter werden vor ihrem Einsatz bezüglich einer Referenzmaschine kalibriert (siehe [2]). Hierbei steht nicht die absolute Positioniergenauigkeit im Vordergrund, sondern der Wunsch, daß sich alle Roboter möglichst wie eine bestimmte Referenzmaschine verhalten sollen. Hierzu wird zunächst eine sogenannte Referenzmessung durchgeführt, indem die Referenzmaschine an einigen ausgewählten Posen vermessen wird. Vor dem Einsatz irgendeines beliebigen Roboters wird dieser an denselben Posen vermessen und dessen Robotermodell derart kalibriert, daß sich dieser Roboter in etwa wie die Referenzmaschine verhält.

Zur Erlangung dieses Zieles reicht es in der Regel aus, nur die Nullagenfehler, wie in Abschnitt 5.7.1 beschrieben, zu modellieren.

Lastwechsel

Oftmals sind Roboter in der Praxis mit Werkzeugwechseleinrichtungen ausgerüstet und entnehmen je nach Bearbeitungsvorgang das entsprechende Werkzeug aus einem Magazin. Da die unterschiedlichen Werkzeuge verschiedene Massen und Schwerpunkte aufweisen, spielt die Kompensation der Getriebenachgiebigkeiten für die Genauigkeit solcher Anwendungen eine wichtige Rolle. Unter der Voraussetzung, daß die Lastdaten vom Benutzer korrekt eingegeben worden sind, werden durch die Berechnung der statischen Drehmomente direkt in der Robotersteuerung die Auswirkungen des Lastwechsels automatisch kompensiert.

Auch wenn kein Lastwechsel stattfindet, kann der Kompensation der Gelenkelastizitäten große Bedeutung zukommen. Ein allmähliches Ausfahren des Werkzeugs oder eines Bauteils durch den Roboter während eines Bearbeitungsvorganges führt ohne Kompensation zu einem kontinuierlichen Absinken der Roboterbahn in Richtung des Schwerkraftvektors. Anwendungen, bei denen es auf die korrekte Wahrung des Abstandes zwischen Werkzeug und Bauteil während einer Bahnbewegung ankommt (z.B. Rollfalzen, Fräsen), sind ohne Berücksichtigung der masse- und ausladungsabhängigen Durchbiegung der Roboterstruktur schwer zu realisieren.

Kapitel 6

3D-Kalibrierung

6.1 Einleitung

Ein Schwerpunkt dieses Kapitels bildet die Umkehrung des im vorigen Kapitel erläuterten Meßprinzips (Abschnitt 6.2). Das in Superposition befindliche, übergeordnete Meßsystem, das einen vom Roboter geführten Maßkörper beobachtet, wird durch das „Auge-in-Hand“-Prinzip ersetzt, dadurch daß der Sensor nun vom Roboter transportiert wird und einen immobilen Maßkörper vermißt.

Der Maßkörper liefert die Grundlage für die metrische 3D-Kalibrierung aus Abschnitt 6.6. Die metrischen Informationen der Meßmerkmale auf dem Maßkörper ermöglichen die kinematische Kalibrierung von Industrierobotern. Damit stellt die 3D-Kalibrierung eine Alternative zum Verfahren der 6D-Kalibrierung dar.

In Abschnitt 6.3 steht zunächst das instationäre Betriebsverhalten von Standard-Industrierobotern im Vordergrund. Aufgrund von thermischen Verformungen der Roboterstruktur weist der TCP eines Roboters bereits im Normalbetrieb eine Temperaturdrift von mehreren Zehntel Millimetern auf.

Für konventionelle Roboterapplikationen, wie das Punktschweißen, mag eine Drift in dieser Größenordnung noch verkraftbar sein, nicht jedoch für die neue Technik des Flexiblen-Inline-Messens (Abschnitt 6.4). Im Rahmen der Qualitätssicherung werden hier Industrieroboter mit optischen Sensoren ausgestattet, um direkt in der Fertigungslinie eine 100 %ige Kontrolle aller produzierter Bauteile zu erreichen. Durch die freie Programmierbarkeit der Industrieroboter ist eine schnelle und flexible Anpassung der Meßstrategie möglich und insbesondere in der Anlaufphase der Linie für die Stabilität des Produktionsprozesses von großer Bedeutung.

Über die Technik des Flexiblen-Inline-Messens eröffnet sich eine elegante Methode, die thermisch bedingte Temperaturdrift direkt mit dem ohnehin vorhandenen Sensor an einem temperaturinvarianten Maßkörper (Abschnitt 6.5) zu erfassen und mittels eines modellbasierten Ansatzes zu kompensieren.

Die in Abschnitt 6.7 vorgestellte Methodik der Drift-Kalibrierung basiert auf einem Einfrieren der Roboterkonfiguration in Form von Meßwerten, die zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme an einem Maßkörper abgenommen werden. Konfigurationsänderungen können nun durch Messung am Kalibrierkörper als Drift nachgewiesen und kompensiert werden.

In Abschnitt 6.8 wird schließlich der empirische Nachweis erbracht, daß durch zyklisches Kalibrieren an einem Maßkörper das instationäre Verhalten der Roboterkinematik nahezu vollständig beseitigt werden kann.

Zum Abschluß dieses Kapitels werden in Abschnitt 6.9 noch Erfahrungen aus der industriellen Umsetzung der neuen Technologie bei diversen Automobilherstellern geschildert.

6.2 Meßprinzip

Das Meßverfahren für die 6D-Kalibrierung basierte darauf, einen optischen Sensor mit großem Arbeitsvolumen in Superposition zu der Einheit Roboter und Maßkörper zu bringen. Die 6-dimensionalen Meßwerte entstanden durch mindestens drei Messungen pro Roboterpose. Sicherlich wäre es auch möglich gewesen, nur eine Punktinformation pro Roboterpose für die Kalibrierung heranzuziehen. Allerdings hätte man dann die doppelte Menge an Posen gebraucht. In Anbetracht des großen Sichtbarkeitsbereiches der eingesetzten Kamera hätte dies einen unnötigen Mehraufwand bedeutet.

Anders stellt sich die Situation bei Verwendung von Triangulationssensoren aus Abschnitt 4.4 dar. Diese kleinen, handlichen und robusten Sensoren eignen sich vorzüglich, um vom Roboter geführt zu werden. Aufgrund ihres kleinen Sichtbarkeitsbereiches sind sie aber kaum dafür geeignet, in einem Bild mehr als einen Punkt zu erfassen. Da die Messung von mindestens drei Punkten in einem Bild Voraussetzung für die Berechnung einer Orientierungsinformation ist, können diese Sensoren nur für eine 3D-Kalibrierung eingesetzt werden.

Trotz der Umkehrung des Meßverfahrens nach dem Auge-In-Hand-Prinzip, sind die resultierenden mathematischen Gleichungen sehr ähnlich. Für bekannte Referenzkoordinaten ${}^{R}p_i$ auf einem Maßkörper und deren Messung ${}^{S}x_i$ im Sensorkoordinatensystem bei zugehörigen Gelenkwinkeln ϑ_i können die beiden Gleichungen

$$\begin{array}{lll} T(\vartheta_i)\,{}^{R}p_j = {}^{S}x_{ij}\,, & 1 \leq i \leq m,\, 1 \leq j \leq k & \text{Superposition} \\ T(\vartheta_i)\,{}^{S}x_i = {}^{R}p_i\,, & 1 \leq i \leq m & \text{Auge in Hand} \end{array}$$

dadurch ineinander überführt werden, indem die Rolle von Messung und Referenz vertauscht wird. Zusätzlich wird hier der Tatsache Rechnung getragen, daß im Falle der Superposition k Messungen ${}^{S}x_{ij}$ pro Pose ϑ_i erfolgen.

6.3 Temperaturdrift

6.3.1 Ursachen

Mittels Modellbildung und Kalibrierung ist es gelungen, das stationäre Roboterverhalten sehr gut vorherzusagen und somit auftretende kinematische Fehler zu kompensieren. Die Genauigkeit eines Industrieroboters wird jedoch nicht nur durch stationäre Fehler negativ beeinflußt, sondern auch durch thermische Störeinflüsse (siehe Abbildung 6.1). Durch Erwärmung oder den umgekehrten Vorgang der Abkühlung der mechanischen Roboterstruktur aufgrund innerer und äußerer Wärmequellen werden erhebliche Positionierungsfehler während des Betriebs hervorgerufen.

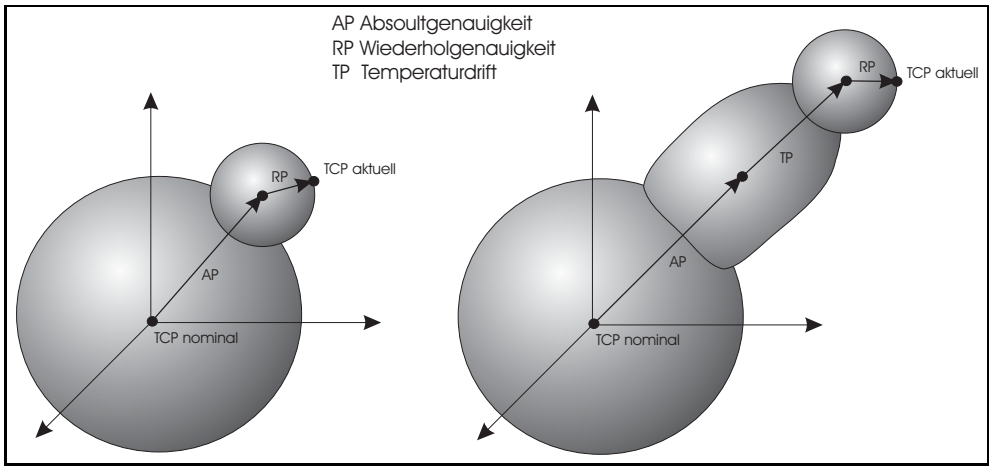


Abbildung 6.1: Stationärer und instationärer Einfluß auf die Genauigkeit

Temperaturgefälle von 20 Grad Celsius in der Roboterstruktur sind durchaus normal und haben verschiedene Ursachen:

- **Antriebe**: Verlustleistung durch spielarme Auslegung von Getrieben und Lagerung, sowie durch Induktion in den Motoren
- **Tageszeit**: Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, beziehungsweise morgens, mittags und abends, teilweise auch lokal begrenzt durch partielle Sonneneinstrahlung
- **Jahreszeit**: Änderung der mittleren Hallentemperatur während des Sommers und des Winters
- **Peripherie**: Temperaturschwankungen hervorgerufen durch Heizgebläse, Zugluft bei offenen Toren oder durch die Nähe zu Schmelzöfen

6.3.2 Auswirkungen

Theoretisch beträgt die Längenänderung einer zwei Meter langen Struktur aus Aluminiumguß bei einem Temperaturgefälle von 20 Kelvin bereits fast einen Millimeter. Zudem sind heutige Industrieroboter überwiegend aus Verbundwerkstoffen, bestehend aus Stahl- und Aluminiumbauteilen, hergestellt. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien bedingen zusätzlich Verformungen und Torsionen der Strukturelemente. Insgesamt überlagern sich diese einzelnen thermischen Effekte und bewirken am TCP eine resultierende Temperaturdrift.

Detailierte Untersuchungen der thermischen Effekte an Industrierobotern wurden von Richter [16] und Gräser [8] durchgeführt und werden an dieser Stelle zusammenfassend aufgelistet:

- **Thermische Längenausdehnung**: Materialspezifische Längenausdehnung bei festen, balkenförmigen Körpern. Bei einseitiger Erwärmung ist die inhomogene Temperaturverteilung über den Körper zu berücksichtigen.

- **Thermische Volumenausdehnung**: Bei volumenhaft ausgebildeten Körpern wie Getrieben führt die Erwärmung durch Reibungsenergie zu einer radialen Ausdehnung der Zahnräder und somit zu einer Erhöhung der tangentialen Vorspannung der Räderpaarungen. Dies hat einen signifikanten Einfluß auf das Verhalten der Getriebe.

- **Thermische Biegung** bei schlanken, balkenförmigen Bauteilen. Sie wird hervorgerufen durch eine inhomogene Temperaturverteilung entlang ihres Querschnitts oder durch die inhomogene Wärmeleitfähigkeit entlang der Längsachse, etwa bei der Verwendung unterschiedlicher Legierungen.

Auf welche Weise sich diese thermischen Effekte auf die einzelnen Baugruppen eines Industrieroboters auswirken, hängt darüber hinaus noch von einer Vielzahl weiterer Faktoren wie Masse, Oberfläche, Wärmekapazität und äußerer Temperaturverteilung ab.

Eine rechnerische Bestimmung der Temperaturdrift erfordert daher die Lösung der Wärmeleitungsgleichung und der thermoelastischen Gleichung in inhomogenen Materialien bei unstetigen Randbedingungen. Selbst für einzelne Baugruppen kann die Drift nur nach starken Vereinfachungen und mittels sehr aufwendiger Finite-Element-Berechnungen näherungsweise bestimmt werden. Eine Vorhersage der resultierenden Temperaturdrift am TCP des Roboters innerhalb einer akzeptablen Rechenzeit zu geben, gilt derzeit und in naher Zukunft als aussichtslos.

6.3.3 Maßnahmen

Der Einfluß thermischer Deformation und die dadurch hervorgerufenen Ungenauigkeiten sind im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus bereits seit längerer Zeit Gegenstand umfangreicher Untersuchungen. Die von Heisel [9] vorgeschlagenen konstruktiven und kompensatorischen Maßnahmen zur Minimierung thermischer Störgrößen können nach Richter [16] auch auf Industrieroboter übertragen werden:

1. Ursachen vermindern
    - Wärmequellen auslagern
    - Wirkungsgrad verbessern
    - Raum klimatisieren
    - Wärmestrahlung verhindern
    - Wärmequellen kühlen
    - Wärmeabgebende Flächen vergrößern
    - Wärmeübergangskoeffizieten vergrößern
    - Wärmekapazität vergrößern
2. Auswirkungen vermindern
    - Thermosymmetrisch konstruieren
    - Materialien mit kleinen Ausdehnungskoeffizienten verwenden

- Roboter warmlaufen lassen oder beheizen
- Roboterposen manuell korrigieren
- Roboterposen gesteuert korrigieren
- Roboterposen geregelt korrigieren

Die verschiedenen Vorschläge zur Verminderung thermischer Einflüsse sind mehr oder weniger erfolgsversprechend. Overbeck [15] ist es beispielsweise gelungen, durch konstruktive Maßnahmen eine annährend lineare thermische Dehnung der Roboterkomponenten zu erreichen. Auf diese Weise konnte der anschließende Kompensationsalgorithmus für die Temperaturdrift verhältnismäßig einfach gehalten werden.

In der Praxis trifft man häufiger auf die Lösung, den Roboter bei konstanter Betriebstemperatur zu betreiben. Hierfür wird der Industrieroboter vor Produktionsbeginn einer definierten Warmlaufphase unterzogen. Dieses einfache und effektive Verfahren setzt allerdings voraus, daß es während der Produktion zu keiner Stillstandszeit und somit zu keiner unerwünschten Abkühlung kommt. Ein erneuter Warmlauf würde in diesen Fall zu einer nicht akzeptablen Ausweitung der Produktionsunterbrechung führen.

Relativ weit verbreitet ist auch die Verwendung verschiedener Produktionsprogramme. Abhängig von der Temperatur oder der Tageszeit werden Programme eingespielt, die manuell korrigierte Roboterposen enthalten und somit der auftretenden Temperaturdrift entgegenwirken. Allerdings ist dieses Verfahren weit davon entfernt, standardisiert zu sein. Im Extremfall findet man die Situation vor, daß eine von der Frühschicht korrigierte Robotertrajektorie bereits von der Tagesschicht erneut korrigiert und somit überschrieben wird. Es ist nicht unüblich, daß sich dieser Vorgang tags darauf wiederholt.

Ein weiterer Lösungsansatz zur Beherrschung des instationären, thermischen Positionierverhaltens besteht in der Verwendung sogenannter Roboterführungssysteme (Janocha [12]). Durch ein extern angebrachtes Sensorsystem wird die Endeffektorposition während des Betriebs fortlaufend überwacht und entsprechend der aktuellen Positionsabweichung korrigiert. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in den enormen Investitionskosten für die Sensorik. Daher wird es kaum vermittelbar sein, konventionelle Roboterapplikationen, wie Punktschweißen, mit einer sensorgestützten Temperaturkompensation auszurüsten.

Die Zusatzkosten für das Sensorsystem entfallen allerdings vollständig, falls die Sensorik ohnehin zur Erfüllung der eigentlichen Applikation benötigt wird, wie im Falle einer Inline-Meßstation.

6.4 Flexibles-Inline-Messen

Vor dem Hintergrund der kontinuierlichen Qualitätsverbesserung in der Automobilindustrie entsteht eine immer größere Forderung nach Genauigkeit in der Fertigung. Zur Zeit liegt diese in einem Bereich von einem halben Millimeter.

Die Überprüfung von Bauteilen auf Form- und Maßhaltigkeit erfolgt heute mit Koordinatenmeßmaschinen in separaten Meßräumen. Die dazu notwendigen Maschinen sind sehr teuer und benötigen zudem spezielle Umgebungsanpassungen, wie Klimatisierung oder Dämpfung. Aufgrund der hohen Meßzeiten können jeweils nur Stichproben der laufenden Fertigung überprüft werden.

Abbildung 6.2: Flexible-Inline Meßtechnik am Hinterbau

In der Linie kommen bis heute Stahllehren zur Überprüfung von Funktionsmaßen zum Einsatz. Beispielsweise werden bei der Türenfertigung im Karosserierohbau Lehren verwendet, die die Türausschnitte der Karosserie nachbilden. Auf diese Weise können Spaltmaß und Bündigkeit bereits vor der Türenmontage überprüft werden. Jeder Modelltyp benötigt allerdings seine eigenen Lehren, die dann neu gefertigt oder aufwendig nachgearbeitet werden müssen, was mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist.

In jüngster Zeit wurden die Lehren immer mehr von laseroptischen Meßstationen verdrängt. Diese vollautomatischen Meßstationen gewährleisten erstmals eine 100 %ige Kontrolle aller produzierten Bauteile. Damit können negative Prozeßtendenzen schnell erkannt und ausgeglichen werden. Allerdings müssen entsprechend der Modellvielfalt mehrere Konfigurationen bereitgestellt werden. Aufgrund der stationären Anbringung der Sensoren ist es in der Regel nicht möglich, dieselben Sensoren zur Vermessung verschiedener Baugruppen zu verwenden, wodurch derartige Stationen hochkomplex und teuer werden. Problematisch ist außerdem die Verwendung von Stahlrohrgestellen als Trägersystem für die stationären Sensoren. Es existieren zwar Algorithmen zur Temperaturkompensation der Gestelle, die darauf basieren, Meßwerte und Umgebungstemperatur in einen funktionalen Zusammenhang zu stellen. Werden allerdings während der Einrichtphase nicht genügend viele Temperaturzustände eingenommen, ist das resultierende Modell lückenhaft und versagt bei Umgebungstemperaturen außerhalb des variierten Bereiches.

Aus diesen Gründen sollen zukünftig Industrieroboter als flexible, kostengünstige Meßsystemträger dienen, bestehend aus einem Standard-Industrieroboter mit montierten optischen Sensor (siehe Abbildung 6.2). Da Roboter frei programmierbar sind, können Änderungen an der Meßstrategie schnell durch Ändern oder Programmieren von Roboterposen vorgenommen werden. Insbesondere bei der Nullserienfertigung und während der Anlaufphase neuer Modelle ist die Überwachung gewisser Merkmale von entscheidender Bedeutung für die Stabilität des Produktionsprozesses. Erfahrungswerte in dieser Phase führen häufig zu einer Anpassung der Messaufgabe. Ein weiterer Vorteil eines Flexiblen-Meßsystems besteht darin, daß auch schwer zugängliche Stellen, wie etwa im

Fahrzeuginnenraum, vermessen werden können.

Standard-Industrieroboter haben neben einem großen Arbeitsraum eine hohe Wiederholgenauigkeit von wenigen Hundertstel Millimetern. Sie eignen sich somit prinzipiell für den Einsatz als Meßsystemträger. Allerdings weisen sie bereits im Normalbetrieb eine relativ hohe Temperaturdrift von etwa 0.5 mm auf, so daß der Einsatz von Robotern in der Fertigungsmeßtechnik nur dann sinnvoll erscheint, wenn deren betriebsabhängige Ungenauigkeit auf ein Minimmum reduziert werden kann.

6.5 Maßkörper

6.5.1 Aufbau

Wie bereits eingangs erwähnt, bildet ein Maßkörper die Basis der 3D-Kalibrierung. In diesem Abschnitt wird nun der Frage nachgegangen, wie der Maßkörper beschaffen sein muß, damit die angewandten Kalibrierverfahren optimale Ergebnisse liefern.

Der Maßkörper wird mit einem optischen Sensor vermessen, nämlich mit demselben, der zur Erfüllung der Meßapplikation eingesetzt wird. Es ist naheliegend, retroreflektierende Marken als Kalibrierpunkte zu verwenden. Diese sind wegen ihres starken Kontrastes zwischen hellen Inneren und dunklen Äußeren hervorragend für die Algorithmen zur Bilderkennung geeignet.

Als Kalibrierverfahren wird einerseits ein metrisches Verfahren, das die Punktkoordinaten der Targets als Eingangsgröße benötigt, andererseits ein relatives Verfahren zur Minimierung der Temperaturdrift angewandt, das lediglich die zeitliche Invarianz der Kalibrierpunkte voraussetzt. Insgesamt ergeben sich also die beiden folgenden Bedingungen für die Kalibrierverfahren:

- Target bekannt
- Target invariant

In Anbetracht dieser Anforderung wurde entschieden, eine Kugel aus Kohlenfaserstoff verstärkten Kunstoff (CFK) als Kalibrierkörper einzusetzen (siehe Abbildung 6.3). Der sehr geringe Längenausdehnungskoeffizient von $2 \cdot 10^{-3}$ mm pro Grad Kelvin kann bei der Herstellung durch geschicktes Aufbringen der Graphitmatten nochmals reduziert werden, so daß die Kalibrierkugel praktisch unabhängig von Temperatureinflüssen ist.

Für die Wahl der Kugelgeometrie gibt es eine Reihe von Gründen. Damit die Punktkoordinaten als bekannt vorausgesetzt werden können, muß der Kalibrierkörper zunächst optisch vermessen werden. Hierfür wird das in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte Verfahren des Mehrbildausgleiches eingesetzt. Es basiert darauf, das zu bestimmende Objekt aus möglichst vielen verschiedenen Perspektiven abzubilden. Damit diese Bilder nachträglich wieder zu einem Ganzen zusammengesetzt werden können, benötigt man in jedem Bild Merkmale, die auch in möglichst vielen anderen Bildern vorkommen. Die Geometrie einer Kugel ist für die Ausbildung solcher Überlappungsbereiche optimal geeignet.

Ein weiterer Vorteil der Kugelgeometrie ist ihre große Kompaktheit bei gleichzeitiger kartesischer Vielfalt der Merkmale durch die gleichmäßige Verteilung auf der Oberfläche.

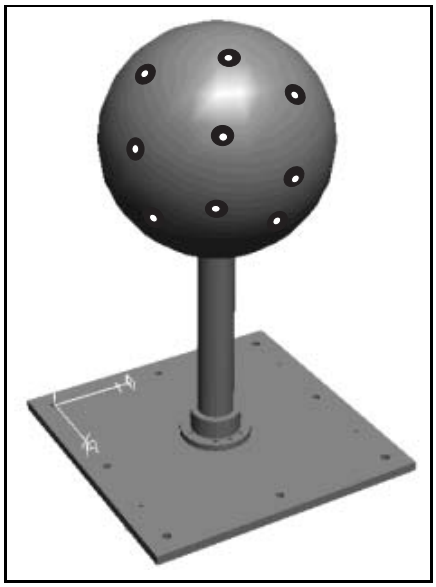


Abbildung 6.3: Kalibrierkugel aus CFK

Dadurch ist es möglich, zusammen mit dem Posengenerator aus Abschnitt 6.5.2 eine große Abdeckung des Achsraumes zu erreichen.

Schließlich läßt sich eine Kugel relativ einfach reinigen, da sich der in einem industriellen Umfeld vorhandene Ölstaub gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt und mit einem trockenen Lappen leicht entfernt werden kann.

Zuletzt sollen noch die Nachteile bei Verwendung einer CFK-Kugel als Kalibrierkörper aufgezeigt werden. Dies ist hauptsächlich der hohe Preis. Er ergibt sich einerseits aufgrund der erhöhten Materialkosten für den Werkstoff CFK. Andererseits erfordert die Herstellung einer Kugel eine aufwendigere Technik. Zudem fallen einmalig die Kosten für eine Negativform aus Stahl an.

Als vernachlässigbar erweist sich der metrische Fehler, der dadurch entsteht, daß die Targets auf einer gekrümmten Oberfläche anstatt auf einem ebenen Untergrund aufgebracht sind. Die Höhe des Kreissektors, der von einem Target mit einem Durchmesser von 5 mm ausgeschnitten wird, beträgt bei einem Kugelradius von 200 mm lediglich 0.01 mm. Der Fehler liegt somit im Bereich des Meßrauschens des Sensors, spielt aber dennoch keine Rolle, da die erreichten Genauigkeiten bei der metrischen Kalibrierung etwa um den Faktor 30 höher liegen.

6.5.2 Posen

Anders als bei Stereosensoren, die nach dem photogrammetrischen Prinzip des Vorwärtsschnittes arbeiten (siehe Abschnitt 4.2.1), benötigen Triangulationssensoren für jede Messung die Orientierung des Sensors zum Meßmerkmal (siehe Abbildung 6.4). Die relative Orientierung des Sensors zum Bauteil, gebildet aus Sensor- und Merkmalwinkel, ermöglicht die perspektivische Entzerrung des Sensorbildes und damit die korrekte Umwandlung in dreidimensionale Meßdaten.

Im Zusammenhang mit der Messung der Kalibrierkugel bedeutet dies, daß die Sensorwinkel der Kalibrierposen entweder manuell gemessen werden oder mittels der bekannten

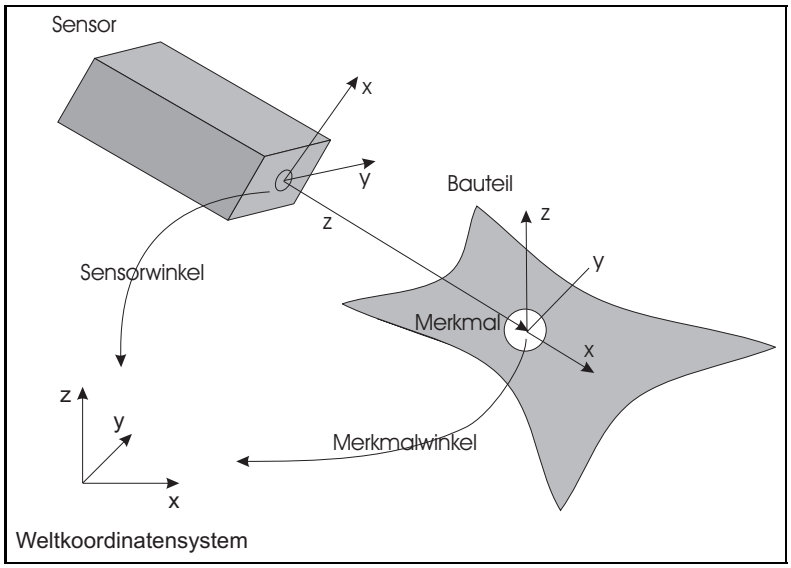


Abbildung 6.4: Sensor- und Merkmalwinkel

Roboterkinematik rechnerisch bestimmt werden. Auf jeden Fall wird der Einsatz eines externen Meßsystems zur Bestimmung der Merkmalwinkel notwendig. Gräser [8] schlägt beispielsweise vor, die Transformation vom Kalibrierkörper in den Roboter mittels eines Lasertrackers zu bestimmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein anderes Verfahren entwickelt. Alle Kalibrierpunkte werden unter den gleichen optischen Bedingungen vermessen, indem jeweils die gleichen Sensor- und Merkmalwinkel verwendet werden. Aufgrund der Kugelgeometrie ist es naheliegend, den Sensor über den Kalibrierpunkten jeweils senkrecht zur Kugeloberfläche zu positionieren (siehe Abbildung 6.5).

Die Aufgabe lautet also, den Sensor S durch den Roboter im Abstand d zu einem Target ${}^K p$ auf der Kugel K mit Mittelpunkt ${}^K m$ und Radius r derart zu positionieren, daß Sensor-Z antiparallel zu dem äußeren Normalenvektor ${}^K n := 1/r\,({}^K p - {}^K m)$ ist.

Das Frame ${}^K_S F := \left({}^K_S R,\, {}^K t\right)$, das die Beziehung zwischen Sensor und Kugel festlegt, erfüllt diese Bedingung für alle $\omega \in [-\pi, \pi[$ mit $q := \sqrt{n_2^2 + n_3^2}$ und

$$
\begin{aligned}
{}^K t &:= {}^K p + d\,{}^K n && (6.1)\\
{}^K_S R &:= \frac{1}{q}\begin{pmatrix} 0 & -q^2 & -q\,n_1 \\ -n_3 & n_1\,n_2 & -q\,n_2 \\ n_2 & n_1\,n_3 & -q\,n_3 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c\omega & -s\omega & 0 \\ s\omega & c\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, && (6.2)
\end{aligned}
$$

wobei mit n_k die k-te Komponente des Normalenvektors ${}^K n$ auf der Kugel bezeichnet wird.

Der *Beweis* erfolgt konstruktiv:
Die Z-Achse ${}^S e_3 = (0,0,1)^T$ des Sensors kann zunächst um einen beliebigen Winkel ω gedreht werden, was durch die ebene Rotation in (6.2) zum Ausdruck kommt. Im Kugelkoordinatensystem wird die Z-Achse durch den Vektor ${}^K e_3 := {}^K_S R\,{}^S e_3$ repräsentiert und ist gleich der dritten Spalte der Matrix ${}^K_S R$. Dieser soll aber gemäß Forderung antiparallel zum äußeren Normalenvektor ${}^K n$ sein, und somit skalar mit diesem multipliziert

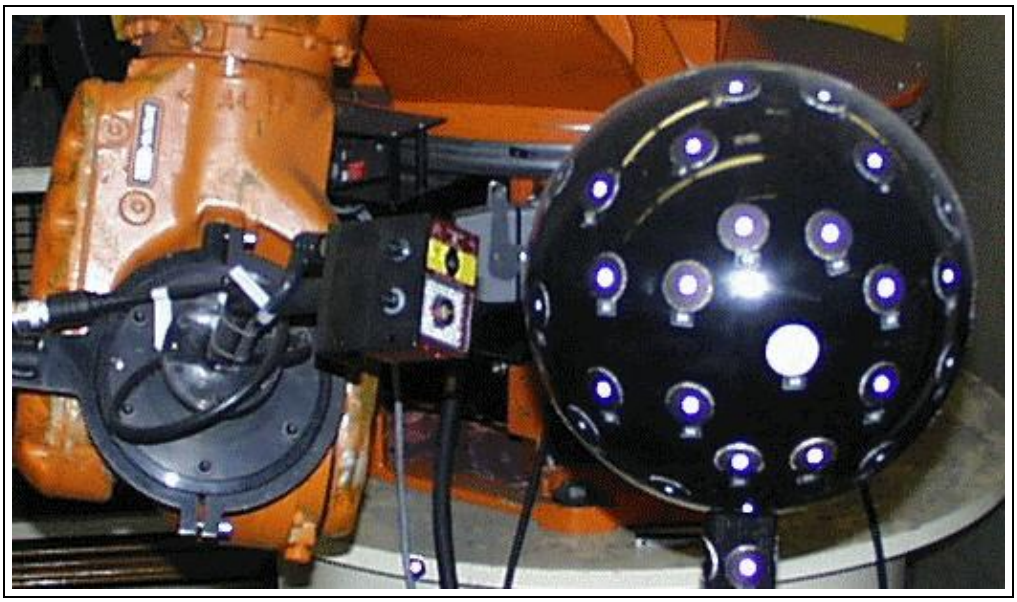


Abbildung 6.5: Orthogonales Positionieren auf der Kalibrierkugel

-1 ergeben. Der einzige Vektor, der dies erfüllt, ist $-{}^{K}n$. Damit ist die letzte Spalte der Matrix ${}^{K}_{S}R$ festgelegt und die restlichen beiden werden so gewählt, daß die Orthonormalitätseigenschaften erfüllt sind und das entstehende Koordinatensystem ein Rechtssystem bildet.

Im Falle $n_1 \approx 1$ erfolgt die Konstruktion äquivalent, indem aus der Schar der zum dritten Basisvektor senkrechten Vektoren, beispielsweise derjenige ausgewählt wird, dessen Y-Komponente gleich Null ist.

Auf diese Weise können für alle Kalibrierpunkte p_j, $1 \leq j \leq k$, auf der Kugel unendlich viele orthogonale Sensorstellungen angegeben werden. Die Wahl der $\omega_j \in [-\pi, \pi[$ wird so getroffen, daß der Pfad von p_{j-1} nach p_j kollisionsfrei ist und die zugehörigen Achswinkel $\vartheta_j = T^{-1}\left({}^{K}_{S}F({}^{K}p_j, \omega_j)\right)$, $1 \leq j \leq k$, den Achsraum des Roboters möglichst gut überdecken. Da Meßpunkte ausgelassen oder mehrmals mit unterschiedlichen Orientierungen gemessen werden können, muß die Anzahl m der Roboterposen nicht notwendigerweise gleich der Anzahl k der Punkte sein.

6.6 Metrische Kalibrierung

Bei der metrischen 3D-Kalibrierung handelt es sich um ein Verfahren zur Bestimmung kinematischer Roboterparameter aufgrund einer 3-dimensionalen Vermessung eines à priori bekannten Referenzkörpers nach dem „Auge-In-Hand"-Prinzip.

Mathematisch bedeutet dies, daß zur Bestimmung der unbekannten Roboterparameter $\lambda \in \mathbb{R}^n$ die m Punktmessungen ${}^{S}x_j \in \mathbb{R}^3$ im Sensorkoordinatensystem über die Roboterkinematik $T(\lambda, \vartheta_j)$ mit den bekannten Referenzkoordinaten ${}^{K}p_j \in \mathbb{R}^3$ in Beziehung gesetzt werden. Der unbekannte Parametervektor λ ergibt sich dann als Lösung des nichtlinearen Minimierungsproblems:

$$\text{Finde } \lambda \in \mathbb{R}^n \text{ mit } \sum_{j=1}^{m} \left\| T(\lambda, \vartheta_j)\, {}^{S}x_j - {}^{K}p_j \right\|_2^2 = \min \tag{6.3}$$

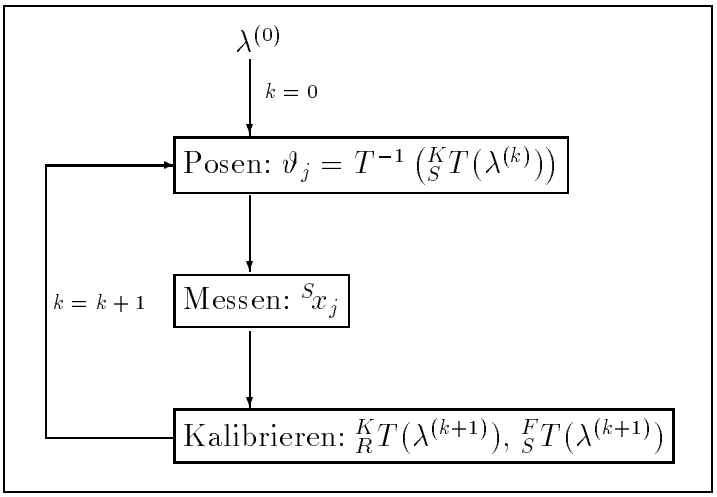


Abbildung 6.6: Iterative Verbesserung von World und Tool

Die Lösung von (6.3) erfolgt mittels der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Methoden der quadratischen Fehlerminimierung.

Abgesehen davon, daß etwa doppelt soviele Kalibrierposen benötigt werden, ist diese Methode gleichwertig mit der 6D-Kalibrierung und insofern geeignet, sämtliche kinematische Parameter wie Längen, Winkel und Elastizitäten zu schätzen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß zur Bestimmung von Gelenknachgiebigkeiten diese physikalischen Effekte auch entsprechend angeregt werden müssen. In Anbetracht des geringen Raumes zwischen Kalibrierkörper und Roboterflansch erscheint es problematisch, große Massen von mehreren hundert Kilogramm unterzubringen.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit das Verfahren der metrischen 3D-Kalibrierung lediglich zum Einmessen der Kalibrierkugel und zur Bestimmung des Sensorbrennpunktes verwendet. Die kinematische Modellierung

$$T(\lambda, \vartheta) = {}^K_R T(\lambda_1, ..., \lambda_6) \cdot {}^R_F T(\vartheta) \cdot {}^F_S T(\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9)$$

besteht in diesem Fall aus 9 Unbekannten, wobei die ersten 6 den Standpunkt des Roboters bezüglich der Kalibrierkugel (World) beschreiben und die letzten 3 den Translationsanteil des Sensors im Flanschkoordinatensystem (Tool). Die Orientierung des Sensors ist aufgrund der reinen Punktinformation der Meßwerte nicht identifizierbar und muß separat bestimmt werden. Dies kann etwa durch taktiles Vermessen des Sensorgehäuses auf einer Koordinatenmeßmaschine geschehen.

Zusammen mit dem Posengenerator aus dem Abschnitt 6.5.2 erhält man mit der metrischen 3D-Kalibrierung ein iteratives Verfahren zur kontinuierlichen Verbesserung von World und Tool. Ausgehend von einem Startvektor $\lambda^{(0)} \in I\!R^9$ für World und Tool, werden über die inverse Kinematik T^{-1} zu jedem Kalibrierpunkt ${}^K p_j$ Gelenkwinkel ϑ_j generiert, die den Sensor annähernd senkrecht zur Kugeloberfläche positionieren. Durch einen anschließenden Meß- und Kalibriervorgang werden World und Tool verbessert, so daß die Positionierung des Sensors im nächsten Schritt genauer erfolgen kann. Somit werden sukzessive die Meßfehler minimiert, die aufgrund der konstanten, idealisiert senkrechten Beziehung von Sensor und Merkmal entstehen. In Abbildung 6.6 wird der gesamte Iterationsprozeß nochmals zusammenfassend dargestellt.

6.7 Drift-Kalibrierung

In diesem Abschnitt wird der Regelkreis vorgestellt, der dem instationären Betriebsverhalten eines Standard-Industrieroboters durch fortlaufendes Kalibrieren an einem CFK-Maßkörper entgegenwirkt.

Die Methode der Drift-Kalibrierung besteht aus drei Teilen: Der meßtechnische Erfassung der Drift, der Identifikation gewisser kinematischer Roboterparameter und der Kompensation der kinematischen Fehler in der Robotersteuerung.

6.7.1 Driftmessung

In die Robotermeßzelle wird ein Kalibrierkörper in Form einer CFK-Kugel eingebracht (siehe Abbildung 6.3). Zunächst wird die Starttransformation für den Standpunkt des Kalibrierkörpers erzeugt, indem man sich mit Hilfe des Sensors in das Kugelkoordinatensystem einmißt. Anschließend werden durch den Posengenerator m kollisionsfreie Frames ${}^K_S T_j$, $1 \leq j \leq m$, generiert, die den Roboter zur Vermessung der $k \leq m$ Kalibrierpunkte ${}^K p_j$ geeignet positionieren.

Wie in Abschnitt 6.6 beschrieben, werden die World- und die Tooltransformation durch wiederholtes metrisches Kalibrieren sukzessive verbessert. Bei Verwendung des Positioniergenauen Roboters aus Abschnitt 5.7.2, also bei Verwendung der modellbasierten Fehlerkompensation, können auf diese Weise im Mittel Positioniergenauigkeiten auf der Kugel von ca. 0.3 mm erwartet werden.

Nachdem der Standpunkt des Kalibrierkörpers und der Brennpunkt des Sensors ausreichend genau bestimmt wurden, kann der für die Drift-Kalibrierung entscheidende Schritt erfolgen, nämlich die Konfiguration des Roboters und seiner Umgebung in Form von Meßwerten einzufrieren:

Zum Zeitpunkt t_0 der Inbetriebnahme werden Referenzmessungen ${}^K x_j^0$, $1 \leq j \leq m$ der Meßmerkmale ${}^K p_j$ auf der Kalibrierkugel vorgenommen und abgespeichert. Diese Referenzmessungen repräsentieren somit die Konfiguration des Roboters zum Zeitpunkt t_0. Ändert sich die Konfiguration des Roboters in der Zeit, beispielsweise durch eine Veränderung der inneren oder äußeren Temperatur, so lautet die Hypothese, daß sich dies auch in einer Änderung der Meßwerte niederschlagen wird.

6.7.2 Identifikation

Ausgehend vom vollständigen Parametersatz $\lambda \in \mathbb{R}^n$ des Roboters, der während der Einmessphase benutzt wurde, werden einige Parameter $\lambda_1, ..., \lambda_l$, $l < n$ ausgewählt. Längen und Winkel, die thermischen Verformungen besonders stark unterworfen sind, werden zur Identifikation herangezogen. Andere hingegen, wie Gelenkelastizitäten, die eine hohe Temperaturunabhängigkeit vermuten lassen, bleiben auf ihre nominellen Werte festgesetzt.

Zum Zeitpunkt t_0 der Inbetriebnahme repräsentiert der Startvektor $\lambda_0 \in \mathbb{R}^l$ die ursprünglichen kinematischen Parameter. Insgesamt wird die Konfiguration des Roboters also durch den Startvektor λ_0 und die Referenzmessung ${}^K x_0$ auf der Kugel festgehalten.

Wird zu einem späteren Zeitpunkt $t_1 = t_0 + \Delta t$ eine weitere Messung ${}^K x_1$ an der Kugel durchgeführt, so repräsentiert die Drift ${}^K\Delta x = {}^K x_1 - {}^K x_0$ implizit die unbekannte Konfigurationsänderung $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ und läßt sich durch die Differenz $T(\lambda_1, \vartheta) - T(\lambda_0, \vartheta)$ der Roboterkinematiken ausdrücken. Die Kinematik $T(\lambda, \vartheta)$ stellt hierbei den 3-dimensionalen Positionsvektor des Endeffektors (Brennpunkt der Kamera) dar, der durch Anwendung der Transformationskette auf den Nullvektor gewonnen wird.

Diskret formuliert, lautet die Aufgabe nun, einen Parametervektor λ_1 zu finden, so das die gemessene Drift ${}^K\Delta x_j$ über alle Roboterposen ϑ_j, $1 \leq j \leq m$, möglichst gut mit der modellierten Drift $T_j(\lambda_1) - T_j(\lambda_0)$ übereinstimmt, wobei $T_j(\lambda) = T(\lambda, \vartheta_j)$ ist. Dieser Ansatz führt direkt zur Formulierung des nichtlinearen Ausgleichsproblems:

$$\text{Finde ein } \lambda_1 \in I\!R^l \text{ mit} \qquad \sum_{j=1}^{m} \left\| T_j(\lambda_1) - T_j(\lambda_0) + {}^K\Delta x_j \right\|_2^2 = \min \tag{6.4}$$

Nach der Linearisierung des Funktionals über einen Korrekturansatz erfolgt die Lösung des resultierenden linearisierten Minimierungsproblems mittels eines iterativen Gradientenverfahrens (siehe Abschnitt 5.3).

Bemerkung: Es kommt nicht darauf an, mit welcher Genauigkeit die Messungen ${}^K x_{0/1}$ erfolgen, sondern nur auf die Genauigkeit der Driftmessung ${}^K\Delta x$. In der Praxis wird die Drift von den verwendeten Meßsystemen direkt gemessen. Die Roboterkinematik wird dabei nur indirekt benutzt, indem über die Orientierung des Sensors (Sensorwinkel) die Drift in das Kugelkoordinatensystem K transformiert wird.

6.7.3 Kompensation

Die identifizierten Parameter λ_1 werden der Robotersteuerung in Form der modifizierten Vorwärtskinematik $\tilde{T} = T(\lambda_1)$ verfügbar gemacht. Die Kompensation der Drift erfolgt in der Steuerung mittels der in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen Approximation 1. Ordnung der modifizierten inversen Kinematik $\tilde{T}^{-1}$.

Durch den modellbasierten Ansatz wird die Drift im gesamten kartesischen Arbeitsraum des Roboters kompensiert, indem korrigierte Achswinkel zum Erreichen einer bestimmten kartesischen Position vorgegeben werden. Insbesondere führt eine erneute Driftmessung an der Kalibrierkugel aufgrund der geänderten Modellparameter λ_1 zu den korrigierten Kalibrierposen

$$\tilde{\vartheta}_j = \tilde{T}^{-1}({}^K_S F_j) = T^{-1}(\lambda_1)({}^K_S F_j)\,, \quad 1 \leq j \leq m\,,$$

wobei die durch (6.1) und (6.2) definierten Frames ${}^K_S F_j = \left({}^K_S R_j,\, {}^K t_j\right)$ Position und Orientierung des Sensors zur Messung der Referenzpunkte ${}^K p_j$ auf der Kalibrierkugel festlegen.

Ein erneutes Minimieren der Drift über die Menge der korrigierten Posen schließt den Regelkreis, der das Betriebsverhalten des Roboters möglichst unabhängig von inneren und äußeren Einflüssen konstant im Zustand der Inbetriebnahme hält.

An dieser Stelle ist es außerdem von Vorteil, daß der Kompensationsalgorithmus nicht nur Positionierungs-, sondern auch Orientierungsfehler berücksichtigt, da die Orthogonalität des Sensors bezüglich der Tangentialebenen von Bedeutung für die Güte der Messungen ist.

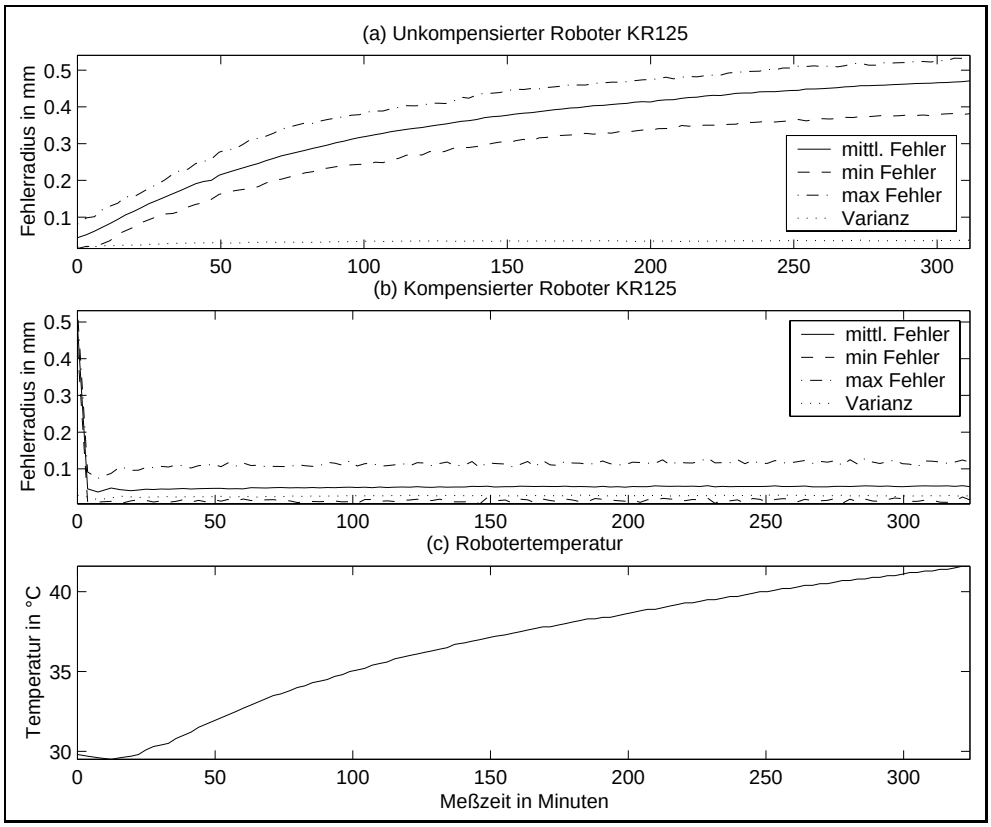


Abbildung 6.7: Unkompensiertes und kompensiertes Driftverhalten bzgl. der Temperatur

6.8 Resultate

Um die Tauglichkeit der Driftkalibrierung nachzuweisen, wurde ein 125kg-Roboter zweimal einem jeweils sechsstündigen Dauertest unterzogen. Einmal mit deaktivierter und einmal mit aktivierter Driftkompensation. Für den Test wurde der Roboter in Folien eingepackt, um die Abgabe von Wärme an die Umgebung zu erschweren und somit eine möglichst deutliche Temperaturdrift zu erreichen.

Abbildung 6.7c zeigt den Temperaturverlauf während des Tests, der asymptotisch ca. 45 Grad Celsius erreicht. Die Drift des unkompensierten Roboters (Abb. 6.7a) erhöht sich gleichzeitig mit der Temperatur und nähert sich im Mittel der 0.5mm-Marke an. Da die Standardabweichung während des gesamten Zeitraums konstant niedrig ist, sind alle Meßpunkte in etwa der gleichen Drift unterworfen.

Nachdem der Roboter vollständig ausgekühlt war, wurde derselbe Test mit aktivierter Driftkompensation wiederholt (Abb. 6.7b). Während der ersten Messung weist der Roboter noch eine Drift von ca. 0.5 mm auf, die darauf zurückzuführen ist, daß der kalte Roboter mit einem „warmen“ Modell betrieben wurde. Nach der ersten Kalibrierung kann die Drift bereits drastisch reduziert werden und bleibt auch im gesamten Verlauf des Tests nahezu konstant auf ca. 0.04 mm.

Auch im Langzeitbetrieb erweist sich die Temperaturkompensation als zuverlässig und robust. Die Meßergebnisse von über 21.000 Kalibrierungen, die innerhalb von knapp sieben Monaten bei einem namhaften bayerischen Automobilhersteller gesammelt wurden, sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

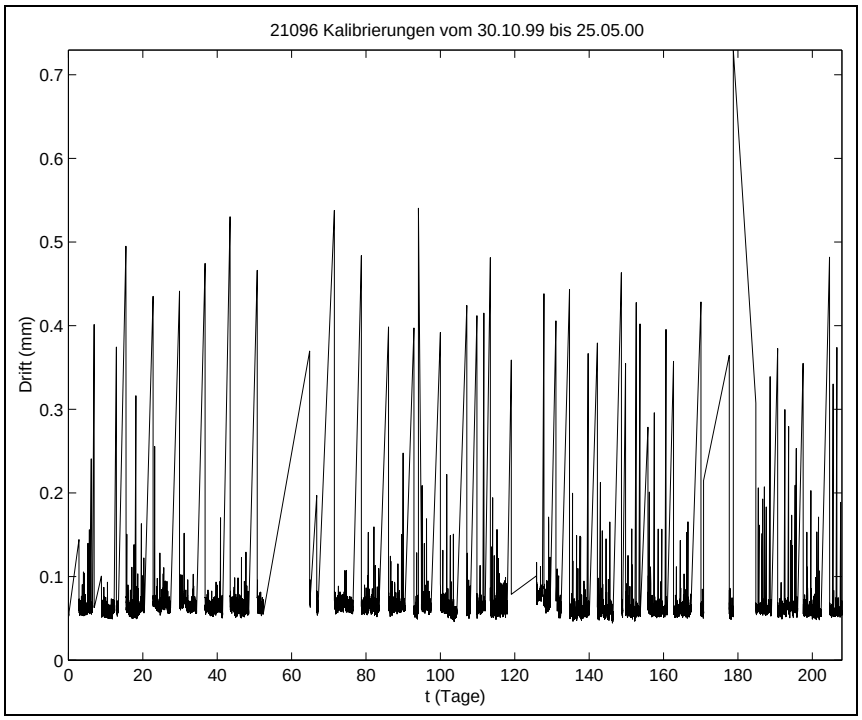


Abbildung 6.8: Temperaturkompensation im Langzeitbetrieb

Es wurden die mittleren Positioniergenauigkeiten des Roboters an der Kalibrierkugel auf der linear skalierten Zeitachse aufgetragen. Auffallend sind die hohen Werte von 0.3 bis 0.7 mm, die nach mehr oder weniger langen Stillstandszeiten, erkennbar durch die Lücken im Graph, auftraten. Sie stellen das Einschaltverhalten des Meßsystems dar, wobei die Sprünge in der Positioniergenauigkeit auf die Temperaturunterschiede von warmen und kalten Roboter zurückzuführen sind. Aufgrund der Dichte der Daten sind Produktionsunterbrechungen von bis zu einem Tag kaum mehr wahrnehmbar. Dennoch sind die größeren Unterbrechungen nach etwa 60, 120, 175 und 180 Tagen leicht auszumachen und mit Hilfe eines Kalenders den Ferienzeiten Weihnachten, Fasching, Ostern und dem 1.-Mai-Feiertag zuzuordnen.

Obwohl die Grafik wegen der vielen Spitzen den Schluß nahelegt, daß relativ hohe Fehler aufgetreten sind, beträgt der Mittelwert über alle Meßwerte gerade 0.063 mm bei einer Standardabweichung von 0.019 mm. Das bedeutet, daß der weitaus überwiegende Teil der Meßwerte in diesem Bereich liegt und die 10 mal so hohen Spitzen in Wirklichkeit so selten auftreten, daß der Mittelwert dadurch kaum beeinflußt wird.

6.9 Industrielle Umsetzung

Um eine Meßapplikation in einer Fertigungsumgebung einzuführen, müssen typische Beschränkungen berücksichtigt werden. Die wichtigste Beschränkung ist wohl die zur Verfügung stehende Taktzeit von einer bis sieben Minuten. In dieser Zeit muß neben der Erfüllung der eigentlichen Meßaufgabe auch der Kalibrierkörper gemessen werden. Hierfür bietet sich die Zuführzeit an, da in dieser Zeit kein Bauteil gemessen werden kann. Trotz einer durchschnittlichen Meßzeit von drei Sekunden pro Meßpunkt und einer typischen Anzahl von 20 bis 30 zu messenden Punkten auf dem Bauteil, reicht die

Abbildung 6.9: Inline Meßstation 5er Baureihe, BMW Dingolfing

Taktzeit bei schnellen Linien nicht aus, den Kalibrierkörper vollständig zu vermessen.

Um dieses Problem zu umgehen, können entweder mehrere Roboter in einer Meßstation betrieben werden, oder die Kalibrierfahrt wird auf mehrere Taktzyklen aufgeteilt. In jedem Takt werden dann nur einige Punkte auf dem Kalibrierkörper gemessen. Sind schließlich nach einigen Takten alle Punkte vermessen, wird der Identifikationsprozeß durchgeführt und das neue Modell in den Roboter geladen. Da das thermische Verhalten des Roboters im Vergleich zu den Taktzyklen sehr langsam ist, hat die Aufteilung der Kalibrierung auf mehrere Meßzyklen kaum Einfluß auf die Güte der Kompensation.

Nach größeren Produktionsunterbrechungen von mehr als 30 Minuten wird vor der eigentlichen Meßaufgabe eine vollständige Kalibrierfahrt durchgeführt. Dadurch wird das durch den abkühlenden Roboter verursachte Einschaltverhalten (siehe Abbildung 6.8) vermieden und es kann eine gleichbleibend hohe Qualität der Meßergebnisse garantiert werden.

Eine weitere Beschränkung für die Qualität der Messungen stellen Vibrationen dar, die gerade in einem industriellen Umfeld verstärkt auftreten. Allerdings hat ein Feldversuch gezeigt (siehe Abb. 6.9), daß ein Industrieboden von 30 cm Stärke in der Regel ausreichend ist, um diese Schwingungen zu neutralisieren. Befindet sich allerdings ein Preßwerk in unmittelbarer Nähe, muß die Meßstation entsprechend gelagert werden.

In einem einjährigen Feldversuch wurde nachgewiesen, daß bei regelmäßiger Reinigung des Sensors und der Kalibrierkugel der Einfluß von Staub weitgehend ausgeschlosen werden kann.

Abschließend bleibt festzustellen, daß die neue Technik des temperaturkompensierten Inline-Messens ihre industrielle Bewährungsprobe bestanden hat und von der Industrie akzeptiert wurde. Mittlerweile wurden weitere Systeme in Anlagen namhafter Automobilhersteller integriert. Unter anderem bei BMW Dingolfing, DaimlerChrysler Bremen, DaimlerChrysler Sindelfingen, Renault Paris, PSA Paris und Audi Neckarsulm. Zum Teil handelt es sich hierbei nur um Testanlagen, zum Teil aber auch um komplette 4-Roboter-Anlagen, die sämtliche Meßaufgaben im Karosserierohbau übernommen haben.

Kapitel 7

1D-Kalibrierung

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung von Industrierobotern auf der Basis von eindimensionalen Meßwerten vorgestellt. Die Messung des Abstandes zwischen Endeffektor und Meßsystem und der anschließende Vergleich mit der euklidschen Norm des TCPs liefert jeweils eine skalare Fehlergleichung, die zur Formulierung des Zielfunktionals aus Abschnitt 7.2 führt. Die Messung des Abstandes kann beispielsweise mit einem Laserinterferometer oder mit dem Fadensystem, das in Abschnitt 4.5 beschrieben wurde, durchgeführt werden.

Der entscheidende Vorteil des Fadensystems liegt in seiner einfachen Bedienbarkeit. Durch seine geringe Größe und sein geringes Gewicht kann es leicht transportiert werden und ist innerhalb weniger Minuten einsatzbereit. Es ist daher ausgeprochen gut für einen direkten Einsatz in der Roboterzelle geeignet. Nach einem Hand- oder Getriebetausch können die entsprechenden Parameter ermittelt, beziehungsweise angepaßt werden. Oftmals ist nach einem Crash eine neue Justage des Roboters erforderlich, da die Getriebe, insbesondere die der Hand, geringfügig verrutschen können. Versieht man das Fadensystem mit einem speziellen Adapter zur Fixierung von Bauteilaufnahmen, kann es auch zur Zellenkalibrierung herangezogen werden, indem der Roboter in das Welt- oder die Bauteilkoordinatensysteme eingemessen wird.

Allerdings bringt die spezielle Bauart des Systems und die Tatsache, daß der Meßvorgang nicht berührungslos erfolgt, gewisse Nachteile mit sich. Der Faden, dessen loses Ende am Endeffektor angebracht ist, wird über eine Rückstellfeder gespannt. Trotz des geringen Eigengewichts kann ein Durchhängen des Fadens nicht vollständig vermieden werden. Außerdem muß, da der Faden über eine Umlenkrolle aus dem Gehäuse tritt, der gemessene Abstand um die Länge des Kreissektors korrigiert werden, den der Faden umwickelt. Da die Korrektur insbesondere vom Standort des Meßsystems abhängig ist und dieser erst im Zuge der Kalibrierung ermittelt werden kann, wird in Abschnitt 7.3 eine Fixpunktiteration vorgestellt, die den Standort und die von den verschiedenen Posen abhängigen Fadenlängen sukzessive ermittelt.

Abschließend wurde das Fadensystem zur Kalibrierung eines Industrieroboters herangezogen. Die Resultate des Feldversuchs, die in Abschnitt 7.4 präsentiert werden, konnten allerdings nicht überzeugen, worauf in der anschließenden Diskussion der Ergebnisse näher eingegangen wird.

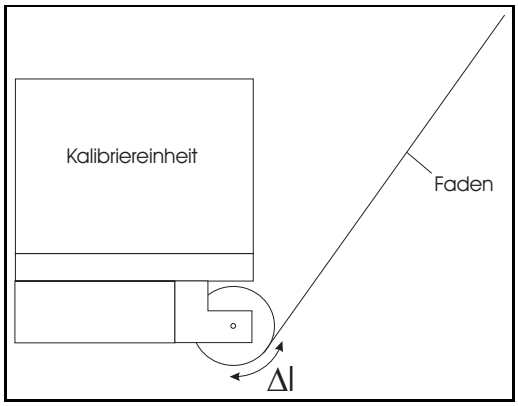


Abbildung 7.1: Umlenkrolle und Fadenlänge

7.2 Zielfunktional

Zur Schätzung des unbekannten Parametervektors $\lambda \in I\!R^n$ wird der Roboter in den Posen ϑ_j , $1 \leq j \leq m$, vermessen. Das Ergebnis der Vermessung sind die m Abstände $d_j \in I\!R$. Bringt man diese in Beziehung zu der nominellen Kinematik $T(\lambda, \vartheta)$ an den Stellen ϑ_j , erhält man für jede Roboterpose eine skalare Fehlergleichung. Wie in Gleichung (6.4) beschreibt die Kinematik $T(\lambda, \vartheta)$ hier einen 3-dimensionalen Positionsvektor, der durch Anwendung der Transformationskette auf den Nullvektor gewonnen wird. Im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate führt dieser Ansatz zu dem folgenden Minimierungsproblem:

$$\text{Finde ein } \lambda \in I\!R^n \text{ mit } \quad \sum_{j=0}^{m} \left\| \, \|T_j(\lambda)\|^2 - d_j^2 \, \right\|^2 = \min \tag{7.1}$$

Die World- und Tooltransformation sind Bestandteil der Kinematik $T(\lambda, \vartheta)$ und werden im Zuge der Parameterschätzung ebenfalls identifiziert, wobei jeweils nur die Translationsanteile berücksichtigt werden können, da die Strecken von der Kalibriereinheit zu den Endeffektorpositionen des Roboters nicht orientiert sind.

Zu beachten ist, daß Gleichung (7.1) die metrischen Informationen nur implizit enthält. Die Optimierung der Kinematik erfolgt derart, daß die senkrechten Projektionen der TCPs $T_j(\lambda)$ auf die Kugeln mit den Radien d_j minimal über alle Posen werden. Das heißt, daß bei der Lösung des nichtlinearen Ausgleichsproblems mittels eines Gradientenverfahrens die Korrekturvektoren in Richtung der senkrechten Projektionen gesucht werden. Diesem Sachverhalt wird durch die Anwendung der Kettenregel bei der Differentiation der Skalarprodukte $\|T_j(\lambda)\|^2$ aus Gleichung (7.1) Rechnung getragen.

7.3 Äußere Iteration

Wie in Abbildung 7.1 ersichtlich, wurde die Kalibriereinheit so konstruiert, daß der Faden über eine Umlenkrolle geführt wird. Wegen der Umwicklung des Fadens um das Rädchen wird ein Längenfehler verursacht, der nachträglich korrigiert werden muß. Die Länge Δl des Kreissektors, die der Faden umwickelt, hängt von der Position und Orientierung der Kalibriereinheit bezüglich des Fadenendpunktes ab. Angenommen, das Meßsystem steht auf ebenen Boden, also parallel zur X-Y-Ebene, kann die Orientierung unberücksichtigt

Startvektor $\lambda^{(0)}$, $\varepsilon^{(0)} = 0$, $n = 0$

$n = n + 1$

Finde $\lambda^{(n)}$, mit

$$\varepsilon^{(n)} := \sum_{j=0}^{m} \left\| \left\| T_j(\lambda^{(n)}) \right\|^2 - d_j^2 \left(T_j(\lambda^{(n-1)}) \right) \right\|^2 = \min$$

Solange $|\varepsilon^{(n)} - \varepsilon^{(n-1)}| \geq \delta$

Abbildung 7.2: Äußere Iteration zur Korrektur der Fadenlänge

bleiben, da die Drehung um die Z-Achse für den Längenfehler ohne Bedeutung ist. Anderenfalls muß die Orientierung der Kalibriereinheit mit einem zweiten Meßsystem ermittelt werden.

Der Längenfehler Δl ist also im wesentlichen eine Funktion der Fadenendposition. Somit ist der tatsächliche Abstand d von der Kalibriereinheit zum TCP des Roboters eine Funktion der gemessenen Länge l und der TCP-Position $T(\lambda)$:

$$d = d\left(l, T(\lambda)\right) = l - \Delta l\left(T(\lambda)\right) .$$

Demnach sind die Abstände, auf deren Basis die Parameterschätzung erfolgt, wiederum selbst abhängig von den kinematischen Parametern und insbesondere vom Standort der Kalibriereinheit. Das Funktional aus Gleichung (7.1) enthält also in Wirklichkeit Terme der Form:

$$\|T_j(\lambda)\|^2 - d_j\left(T_j(\lambda)\right)^2 , \quad 1 \leq j \leq m .$$

Somit sind die Abstände keine konstanten Funktionen mehr und müssen bei der Gradientenbildung entsprechend differenziert werden. Leider sind maßgebliche Parameter, wie der Radius der Umlenkrolle, sowie der gesamte Korrekturalgorithmus unbekannt, da dieser nur als „Black Box“ in Form einer DLL vom Hersteller mitgeliefert wird.

Diese Problem wird dadurch umgangen, daß die d_j weiterhin als konstant angenommen werden und stattdessen die Lösung des Minimierungsproblems (7.1) innerhalb einer Fixpunktiteration erfolgt (siehe Abbildung 7.2). Jedesmal wenn eine Schätzung $\lambda^{(n)}$ des Parametervektors vorliegt, werden die Fadenlängen d_j , $1 \leq j \leq m$, korrigiert und eine erneute Minimierung des Funktionals kann beginnen. Der Prozeß endet, wenn sich eine Änderung der Parameter kaum mehr auf eine Änderung der Längen auswirkt, also wenn der Fixpunkt annähernd erreicht wird.

7.4 Resultate

Zur Validierung des Verfahrens wurde ein 150kg-Roboter unter einer Last von 150kg mit Hilfe des Fadensystems in 336 Posen vermessen. Neben den Translationsanteilen der World- und Tooltransformation wurden weitere 14 Parameter für die Identifikation ausgewählt. Dies waren sämtliche Linklängen in den Achsen 2 bis 5, die Z- und Y-Verschiebung in Achse 5, die Elastizitätskoeffizienten der Achsen 2, 3 und 5 in Richtung des Freiheitsgrades, sowie zwei zusätzliche Drehwinkel in den Achsen 2 und 5. Die

	0 mm		500 mm		1000 mm	
	1D-Kal	Nom	1D-Kal	Nom	1D-Kal	Nom
$\bar{\varepsilon}$	1.378	1.090	1.775	1.644	2.392	2.556
$\varepsilon_{\min}$	0.532	0.282	0.596	0.714	0.493	1.185
$\varepsilon_{\max}$	3.814	2.412	4.266	3.076	4.882	4.807
σ	0.863	0.545	0.975	0.713	1.253	1.096

Tabelle 7.1: Posegenauigkeit der 1D-Kalibrierung/Zellenkalibrierung

Parameter der Achsen 1 und 6 sind aufgrund linearer Abhängigkeiten mit den freien Parametern der World- und Tooltransformation nicht identifizierbar.

Der Algorithmus konvergierte relativ schnell, nach nur 9 äußeren Iterationen mit einem durchschnittlichen Restfehler von ca. 0.25 mm pro Pose. Anschließend wurde derselbe Roboter an 16 unabhängigen Posen mittels zweier RSC-Kameras vermessen (siehe Abschnitt 5.6.3). Anhand dieser unabhängigen Daten wurde überprüft, ob das durch die 1D-Kalibrierung gewonnene Modell die Kinematik des Roboters ausreichend genau beschreibt.

Damit die Daten möglichst aussagekräftig sind, wurde anschließend eine Zellenkalibrierung durchgeführt, also es wurden World- und Toolframe bei fixierten kinematischen Parametern neu bestimmt. Zu Vergleichszwecken fand zusätzlich eine Zellenkalibration auf der Basis des nominellen kinematischen Modells statt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 7.1 zusammengefaßt.

Auf den ersten Blick erkennt man, daß die Genauigkeit der 1D-Kalibrierung weit von den Werten entfernt ist, die gewöhnlich bei der 6D- bzw. 3D-Kalibrierung erreicht werden. Darüber hinaus sind die Werte bei kleinen Werkzeuglängen sogar schlechter als diejenigen, die man bei Verwendung der unkalibrierten Kinematik erwarten darf. Dies mag zum einen daran liegen, daß die Genauigkeiten dieses nominellen Roboters bereits relativ hoch sind. Allerdings wurden zur Verifikation nur 16 Posen verwendet, die zudem keine großen Konfigurationsänderungen aufwiesen, so daß über eine reine Transformation der Roboterbasis schon gute Ergebnisse erzielt werden können. Dies alles darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß die 1D-Kalibrierung mittels des verwendeten Fadensystems als gescheitert erklärt werden muß. Ein weiteres Indiz dafür liefern die identifizierten Modellparameter. Zum Beispiel weicht die Verbindungsstrecke zwischen Achse 2 und 3 um 2.75 mm von ihrem nominellen Maß ab. Normalerweise beträgt diese Abweichung wenige Hundertstel bis maximal 2 Zehntel Millimeter.

Der banalste Grund, der zur Erklärung des Versuchsausgangs herangezogen werden kann, ist der, daß das Fadensystem nicht richtig kalibriert war oder sich im Laufe der Zeit durch eine Dehnung des Fadens dekalibriert hat. Ein weiterer Grund könnte sein, daß das Durchhängen des Fadens aufgrund seines Eigengewichts nicht kompensiert wurde. Die Berechnung eines falschen Minimums, dadurch daß die Fadenlänge als konstante Funktion betrachtet wurde, gilt als eher unwahrscheinlich, da die Fixpunktiteration schnell und zuverlässig konvergierte.

Kapitel 8

Software

8.1 Einleitung

Bei der Entwicklung der Kalibriersoftware wurde großer Wert auf Datenabstraktion und Objektorientiertheit gelegt. Das heißt, es wurden Konzepte angewendet, die die zugrundeliegenden Eigenschaften der Objekte isolieren und sich dadurch bequem, einfach und sicher in verschiedene Kontexte einsetzen lassen, ohne daß implementationsspezifische Details zur Verfügung stehen müssen.

Das Klassenkonzept der Programiersprache C++ (siehe [24]) bot sich dafür an, da diese Sprache und ihre Standardbibliotheken ein hohes Maß an Portabilität aufweisen und fortschrittliche Techniken, wie Datenkapselung, Zugriffskontrolle, Typumwandlung, symbolische Konstanten, Inline-Funktionen, Default-Argumente, Polymorphie, das Überladen von Funktionen und Operatoren, abstrakte Klassen, Mehrfachvererbung, Templates, Ausnahmebehandlung und Speichermanagement bereitstellen.

Der Kern der Kalibriersoftware, der in Abschnitt 8.2 beschrieben wird, benutzt ausschließlich Elemente aus dem C++ -Sprachumfang und kann plattformunabhängig übersetzt werden. Einerseits wird er, übersetzt mit dem GNU++ -Kompiler, direkt in die Robotersteuerung eingebunden und übernimmt durch Auswerten der modellbasierten Kinematikklassen die Aufgaben der Vorwärts- und Rückwärtstransformation, sowie der Fehlerkompensation in Echtzeit.

Andererseits bildet der Kernel zusammen mit den numerischen Lösern die Basis, auf deren Grundlage die Implementierung der MS-Windows-Anwendungen aus Abschnitt 8.3 und die Anbindung der verschiedenen Sensorsysteme realisiert wurden. Sämtliche Anwendungen wurden mit Visual C++ (siehe [13]) übersetzt und verwenden das MFC-Anwendungsgerüst (Microsoft Foundation Classes). Der gesamte Datenbestand (siehe Abb. 8.1), der zur Ausführung der einzelnen Applikationen benötigt wird, ist in einer MS-Access-Datenbank gespeichert, wobei der Datenzugriff über DAO (Data Access Objects) erfolgt.

Eine Besonderheit der Robotersteuerung von KUKA stellt die gleichzeitige Koexistenz zweier Betriebssysteme auf einem Standard-Industrie-PC dar: Das Betriebssystem Windows95, verantwortlich für die graphische Benutzerführung, und das Echtzeitbetriebssystem vxWorks, auf dem die eigentliche Robotersteuerung abläuft. Der Datenaustausch

zwischen diesen beiden Systemen wird über einen geteilten Speicherbereich (Shared Memory) abgewickelt.

Unter Ausnutzung dieser Besonderheit ist es gelungen, eine elegante und einfache Methode zur Anbindung von Sensorsystemen an die reale Robotersteuerung zu finden. Die Kommunikation (Datenaustausch und Synchronisation) zwischen Sensor und Robotersteuerung findet auf dem Umweg einer dazwischen geschalteten Windows-Anwendung statt, die zudem komplizierte Aufgaben, wie Datenverwaltung oder Parameterschätzung, übernehmen kann. Der Vorteil besteht darin, daß einerseits die PC-basierte Technolgie von Einschubkarten und deren Treibern verwendet werden kann, und andererseits, daß kein Eingriff in die eigentliche Robotersteuerung nötig ist.

8.2 Kernel

Den Kern der Kalibrierungssoftware bilden skalare Funktionen, die daraus zusammengesetzten kinematischen Objekte und die Operatoren zur Bildung der Zielfunktionale. Der Bauplan für die Konstruktion dieser Elemente leitet sich stets aus deren mathematischer Definition ab.

Bei den Erzeugenden eines Frames (Drehwinkel und Translationsanteile) kann es sich entweder um konkrete Werte oder um skalare Funktionen handeln, deren Auswertung wiederum von Funktionen oder konkreten Werten abhängt. Die Realisierung erfolgt am besten über eine rekursive Datenstruktur, die eine virtuelle Auswertefunktion besitzt. Durch die Definition weniger elementarer Funktionen, wie der konstanten Funktion, der Identität, der Summe und dem Produkt, lassen sich bereits komplizierte Funktionsbäume konstruieren, deren Auswertung allein durch den Aufruf der Basisklassenfunktion angestoßen wird. Teilt man den abgeleiteten Klassen außerdem mit, wie ihre Differentiale gebildet werden, erhält man einen Mechanismus zur automatischen Differentiation von Funktionen, der Vorschriften wie die Produkt- oder Kettenregel korrekt ausführt.

Die Klasse der Frames, die Funktionsbäume als Erzeugende hat, besitzt ihrerseits wiederum eine Funktion zur Auswertung, indem die Elementeinträge der Rotationsmatrix und des Translationsvektors aus den skalaren Funktionen ermittelt werden. Die abgeleitete Klasse der elastischen Frames verhält sich ebenso, indem sie die Funktionalität der Basisklasse erbt, berechnet aber zusätzlich die statischen Drehmomente und addiert die resultierenden Winkelabweichungen zu den anliegenden Drehwinkeln.

Die einzelnen Frames, deren Modellierung streamfähig ist und von Datei eingelesen werden kann, werden schließlich zu einer Transformationskette zusammengefaßt, deren Ableitung, versehen mit den jeweiligen Freiheitsgraden, einen Manipulator darstellt, der zudem die Möglichkeit der Gradientenbildung anbietet.

Ganz ähnlich sieht das Konzept des Operators aus, der zur Konstruktion der jeweiligen Zielfunktionale herangezogen wird. Er besitzt virtuelle Funktionen zur Bildung des Residuums, zur Konstruktion der Jakobimatrix und zur Verwertung des Korrekturvektors. Eine Realisierung des Gauß-Newton-Verfahrens und der beteiligten numerischen Löser läßt sich dann allein aufgrund der Kenntnis der abstrakten Basisklasse vollziehen, unabhängig davon, ob die Implementierung sich auf eine 6D-, 3D- oder 1D-Kalibrierung (oder sonst eine) bezieht.

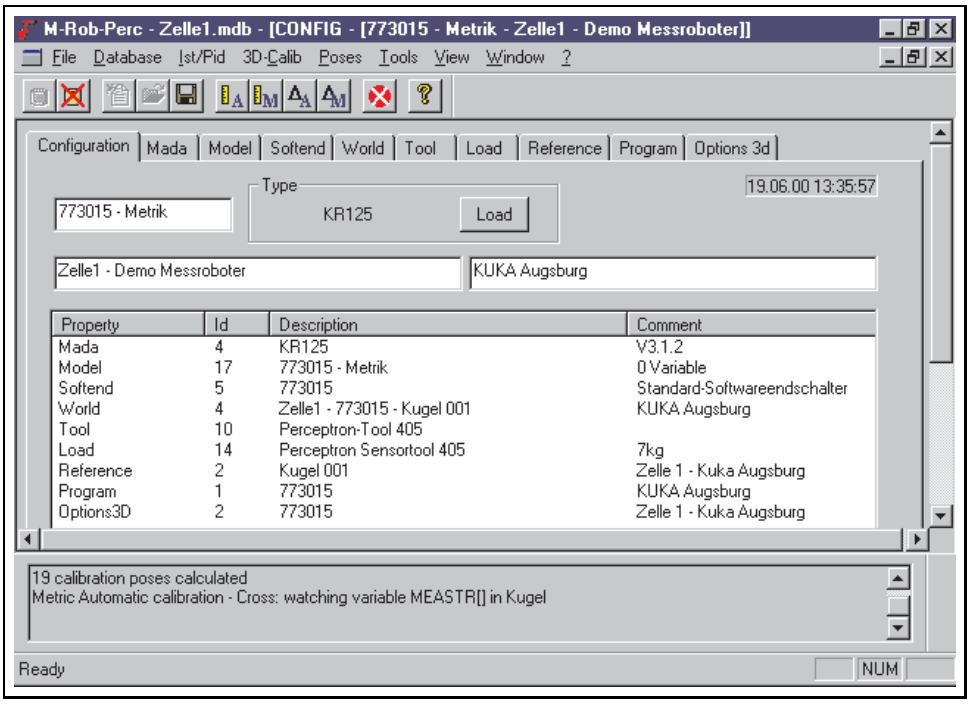


Abbildung 8.1: MS-Windows-Software M-Rob

Auch für die inverse Kinematik existieren unterschiedliche Implementierungen, denen ein abstraktes Konzept zugrunde liegt. Unabhängig davon, ob die Standard-Inverse oder die modifizierte Inverse (oder irgendeine andere) instantiiert wird, findet deren abstrakte Basisklasse an vielen Stellen Verwendung.

8.3 Applikationen

Für die fünf Sensoren, die in Kapitel 4 vorgestellt wurden, und für zwei weitere Meßsysteme wurden Windows-Applikationen entwickelt, die für eine Anbindung der jeweiligen Sensoren sorgen und in einigen Fällen auch die Kommunikation mit der Robotersteuerung realisieren. Auch hier wurde das Konzept der Modularität weitgehend eingehalten, so daß die verschiedenen Anwendungen die gleichen Basisklassen benutzen und nur dort, wo sie sich von den anderen Anwendungen unterscheiden, ihre eigenen Implementationen verwenden. Exemplarisch ist in Abbildung 8.1 die Benutzeroberfläche der Software M-Rob-Perc dargestellt.

Die Auflistung und Beschreibungen der einzelnen Softwarepakete ist nach Kalibrierverfahren gegliedert. Die Programmnamen aus der Produktfamilie setzen sich aus einem vorangestellten „A“ oder „M“, für Absolutroboter oder Meßroboter, dem Wort „Rob“ und einer Kurzbezeichnung für das integrierte Meßsystem zusammen.

- 6D-Kalibrierung
  - **A-Rob-Rsc**: Anbindung einer oder mehrerer Réseau-Scanning-Kameras zur Absolutvermessung von Industrierobotern. Volle Integration der bildverarbeitenden Software. Separater PC nötig. Posensteuerung und Synchronisation des Roboters über serielle Schnittstelle.

  - **A-Rob-Kryp**: Anbindung einer Infrarotkamera der Firma Krypton zur Absolutvermessung. Auf der Robotersteuerung lauffähig. Kommunikation mit der Robotersteuerung über Shared Memory. Steuerung der Kamera über eine TCP/IP-Socket-Verbindung.
  - **A-Rob-Leica**: Dateischnittstelle für die Posensteuerung des Lasertrackers der Firma Leica zur Absolutvermessung. Eine vollständige Integration steht noch aus.

- 3D-Kalibrierung
  - **M-Rob-Perc**: Meßroboterapplikation. Anbindung des Lasertriangulationssensors der Firma Perceptron. Auf der Robotersteuerung lauffähig. Steuerung des Sensors über serielle Schnittstelle. Kommunikation mit dem Roboter über Shared Memory.
  - **M-Rob-LMI**: Meßroboterapplikation. Anbindung des Lasertriangulationssensors der Firma LMI. Vollständige Integration der Hardware (Einschubkarten) und Software (Bildverarbeitung) auf dem Steuerungs-PC des Roboters. Kommunikation erfolgt auschließlich über das sehr schnelle Shared Memory.
  - **A-Rob-Optis**: Dateischnittstelle zum axial messenden Sensor der Bundeswehrhochschule Hamburg. Der Sensor wird hauptsächlich zur Justage von Industrierobotern eingesetzt.

- 1D-Kalibrierung
  - **A-Rob-Dyn**: Anbindung des Fadensystems der Firma Dynalog zur Absolutvermessung von Industrierobotern. Lauffähig auf der Robotersteuerung. Steuerung der Kalibriereinheit über serielle Schnittstelle. Ständige Überwachung der Achswerte des Roboters durch Shared Memory. Bei Stillstand des Roboters wird automatisch eine Messung ausgelöst und die dazugehörigen Achswinkel registriert. Dadurch ist Kalibrierung durch händisches Verfahren des Roboters möglich.

Kapitel 9

Schlußbetrachtung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 6D-, 3D- und 1D-Kalibrierverfahren für Industrieroboter entwickelt. In praktischen Versuchen wurde die Funktionstüchtigkeit der Verfahren unter Beweis gestellt. Durch die Anbindung unterschiedlicher Sensorsysteme wurde ein weites Gebiet an industriellen Anwendungen erschlossen. Die kommerzielle Umsetzung der Verfahren in bedienerfreundliche Software sorgte für eine weite Verbreitung und den beinahe täglichen Einsatz der Produkte, so daß mittlerweile weit über 1000 Industrieroboter kalibriert wurden.

Die erfolgreiche Temperaturkompensation durch zyklisches Kalibrieren an einem Maßkörper und dessen beeindruckende Langzeitstabilität verhalfen dem Einsatz von Standard-Industrierobotern in der Flexiblen-Inline-Meßtechnik zu einem Durchbruch. Derzeit gibt es ernsthafte Bestrebungen, diese neue Technik im Karosserierohbau flächendeckend zur Qualitätskontrolle einzusetzen.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zusammengefaßt. Der letzte Abschnitt gibt einen Ausblick über mögliche Fortsetzungsarbeiten.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Teilziele, die zur erfolgreichen Entwicklung und Implementierung der einzelnen Kalibrierverfahren beigetragen haben, sind nach Themengebieten geordnet im Folgenden aufgelistet:

1. Modell
   (a) Bessere Entsprechung mit der realen Kinematik durch Verwendung der 6-parametrigen Framedarstellung anstatt der üblichen 4-parametrigen Denavit-Hartenberg-Darstellung
   (b) Hohe Flexibilität durch einen parametrisierbaren, modellbasierten Ansatz
   (c) Unabhängigkeit von Masse und Ausladung durch die Modellierung linearer Gelenkelastizitäten
   (d) Effiziente Berechnung der statischen Drehmomente

   (e) Schnellere Konvergenz und höhere Genauigkeit durch Verwendung analytischer Differentiale für das Gradientenverfahren an Stelle numerischer Differentiale

2. Kompensation
   (a) Schnelle Approximation der inversen Kinematik
   (b) Kompensation in Echtzeit durch Implementierung in die reale Robotersteuerung

3. Zielfunktional
   (a) Einführung der Basisnorm als Maß auf dem Raum der affinen Abbildungen
   (b) Vermeidung von Unstetigkeiten und Berücksichtigung der Orientierungsfehler durch Konstruktion des Residuenoperators

4. 6D-Kalibrierung
   (a) Anwendung des Maßkörperprinzips zur Gewinnung von 6D-Information aus 3D-Werten. Zusätzliches Gütekriterium für die Qualität der Messungen.
   (b) Erzeugung von Startiterierten für die zuverlässige Konvergenz des Verfahrens
   (c) Roboterjustage durch Multi-Pose-Vermessung als Anwendung der 6D-Kalibrierung
   (d) Positioniergenauer Roboter

5. 3D-Kalibrierung
   (a) Meßprinzip „Auge-in-Hand“
   (b) Posengenerierung durch Erzeugung senkrechter und kollisionsfreier Roboterposen auf der Kalibrierkugel
   (c) Metrische Kalibrierung zum Einmessen des Sensors und der Kalibrierkugel
   (d) Driftkalibrierung zur Erfassung und Kompensation der Temperaturdrift
   (e) Aufbau eines Regelkreises durch zyklische Kalibrierung
   (f) Industrielle Umsetzung des Flexiblen-Inline-Messens und Nachweis der Langzeitstabilität

6. 1D-Kalibrierung
   (a) Formulierung des Zielfunktionals als Abstandsfunktion
   (b) Geschachtelte Iteration zur sukzessiven Standortbestimmung
   (c) Einsatz zur partiellen Kalibrierung nach Komponententausch

7. Software
   (a) Automatische Differentiation des frei parametrisierbaren Modells
   (b) Anbindung unterschiedlicher Sensoren
   (c) Client-Server-Kommunikation mit dem Echtzeitbetriebssystem vxWorks

9.2 Ausblick

In den letzten Jahren zeigte sich ein zunehmendes Interesse der Industrie an Parallelkinematiken. Parallele Strukturen zeichnen sich vor allem durch hohe Steifigkeit und hohe Dynamik aus, weisen allerdings ein ungünstiges Verhältnis des Arbeitsvolumens zu der Größe des Gesamtsystems auf. Neben der Automatisierungs- und Fertigungstechnik ist der Einsatz von Parallelkinematiken auch für die Telemanipulation, die Chirurgie, sowie für die Mikromontage von Interesse. Innerhalb dieser Aufgabenfelder nehmen die Genauigkeitsanforderungen, die an solche Systeme gestellt werden, kontinuierlich zu, so daß auch hier das Thema Kalibration an Bedeutung gewinnt.

Man unterscheidet zwei Typen von parallelen Kinematiken (siehe Abbildung 9.1):

1. Vollständig parallele Kinematiken, die aus einer einzelnen oder mehreren geschlossenen Ketten bestehen (z.B. Steward-Plattform, Tripod, Hexapod).

2. Hybride Kinematiken, die einzelne parallele Komponenten (z.B. Parallelogramme, Slider-Crank-Mechanismen) als Bestandteil einer seriellen Struktur enthalten.

Die Problematik bei der Modellierung geschlossener Ketten besteht darin, daß die Vorwärtskinematik durch algebraische Nebenbedingunen beschrieben wird. Die Identifikation der kinematischen Parameter führt zu der Formulierung eines restringierten Minimierungsproblems, das mittels Lagranger-Multiplikatoren dargestellt werden kann. Allerdings sind die Nebenbedingungen aufgrund der mechanischen Struktur der Ketten meistens nicht stetig differenzierbar, was für alle numerischen Verfahren der nichtlinearen Optimierung Voraussetzung ist.

Solange die Kinematik nur planare, geschlossene Strukturen enthält, kann sie nach Schröer [22] serialisiert werden, indem die Achswinkel φ der geschlossenen Kinematik T mittels einer Kopplungsfunktion G in äquivalente Achswinkel ϑ einer seriellen Kinematik S transformiert werden:

$$\begin{aligned} T(\varphi) &= S\left(G(\varphi)\right) \\ G(\varphi) &= \vartheta\,. \end{aligned}$$

Bei vollständig parallelen Strukturen handelt es sich aber in der Regel nicht um planare Mechanismen, so daß diese Vorgehensweise nicht angewendet werden kann. In diesen Fällen empfiehlt es sich, die wesentlich einfachere inverse Kinematik für die Modellierung zu benutzen.

Wie bei den seriellen Kinematiken basiert die Modellierung der parallelen Strukturen auf der Parametrisierung von geometrischen (Längen, Winkel) und nicht geometrischen Abweichungen (Elastizitäten). Allerdings können die Elastizitätseffekte geschlossener Ketten nicht wie die offener Ketten behandelt werden, da die Nachgiebigkeiten bei gleichem Schwerkraftvektor in unterschiedliche Richtungen wirken. Außerdem können die Verbiegung eines Strukturelements und die Nachgiebigkeit eines Gelenks in einem Parallelogramm nicht unabhängig voneinander identifiziert werden, so daß zunächst eine geeignete Entkoppelung der beiden Elastizitäten gefunden werden muß.

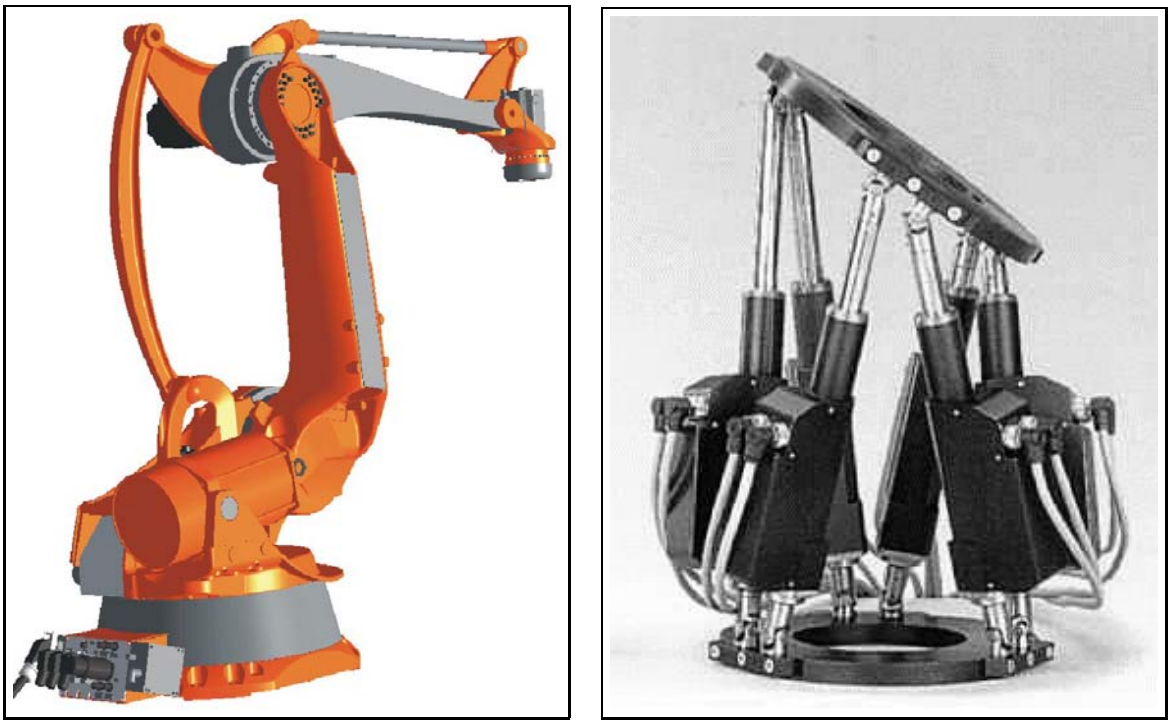


Abbildung 9.1: Kinematiken mit teilweiser und vollständiger paralleler Struktur

Anhang A

Formelsymbole

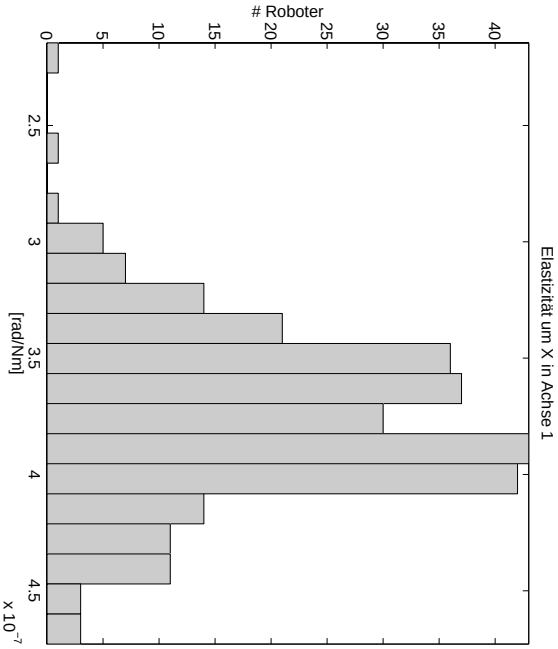
ϑ	Vektor der Gelenkstellungen
λ	Vektor der Freiheitsgrade, meist Parametervektor des Robotermodells
$\lambda^{(0)}$, $\lambda^{(j)}$	Startvektor bzw. j-te Iterierte des Parametervektors
t	Translationsvektor
R	Rotationsmatrix
r_{ij}	ij-ter Elementeintrag einer Rotationsmatrix
$c\alpha, s\omega$	Abkürzungen für $\cos\alpha$ bzw. $\sin\omega$
${}^{i}t_{i+1}$	Translationsvektor des $i+1$-ten Links bzgl. Koordinatensystems i
${}^{i}_{i+1}R$	Rotationsmatrix des $i+1$-ten Gelenks bzgl. Koordinatensystems i
T, F	Frame
${}^{0}_{n}T$, T	Transformationskette bzw. Vorwärtstransformation eines Roboters
T^{-1}	Inverse Kinematik oder Rückwärtstransformation
$\tilde{T}$	Parametrisierte Vorwärtstransformation
$\tilde{T}^{-1}$	Parametrisierte Rückwärtstransformation
$\tilde{F}$	Frame des Endeffektors unter Verwendung von $\tilde{T}$
F^{*}	Korrigiertes Frame
${}^{0}g_{i}$	Gravitationsvektor der i-ten Roboterachse bzgl. der Welt
${}^{0}f_{i}$	Summe der ersten i Gravitationsvektoren bzgl. der Welt
${}^{i}s_{i}$	Schwerpunkt der i-ten Roboterachse
${}^{i}m_{i+1}$	Drehmoment der $i+1$-ten Roboterachse bzgl. der vorherigen Achse
m	Masse einer Roboterachse
g	Erdbeschleunigung

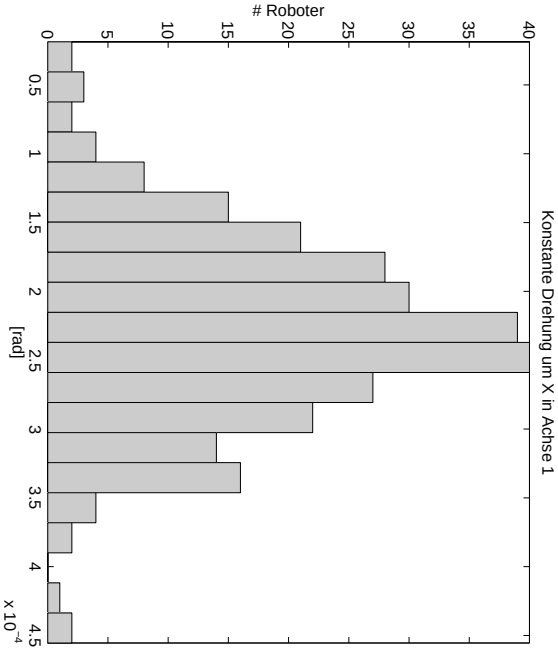
e_i	i-ter Basisvektor
$\|\cdot\|_2$	Euklidsche Norm
$\|\cdot\|_e$	Basisnorm
$\mathbf{r}$	Residuenvektor
$\mathbf{R}$	Jakobimatrix des Residuenoperators
ζ, $\Delta\lambda$	Korrekturvektor für den Parametervektor
p	Bekannter 3d-Positionsvektor eines Targets
X	Gemessene 3d-Koordinaten eines Targets
Δx	Gemessene 3-dimensionale Drift
d, l	Skalare Längen
M	Koordinatensystem des Meßsystems
W	Werkzeugkoordinatensystem
F	Flanschkoordinatensystem
R	Roboterkoordinatensystem
K	Kugelkoordinatensystem
S	Sensorkoordinatensystem
d	Anzahl der Roboterachsen
n	Anzahl der kinematischen Parameter bei der 6D-Kalibrierung
l	Anzahl der kinematischen Paramater bei der Driftkalibrierung
m	Anzahl der Messungen bzw. Posen
k	Anzahl der Kalibrierpunkte auf einem Referenzkörper

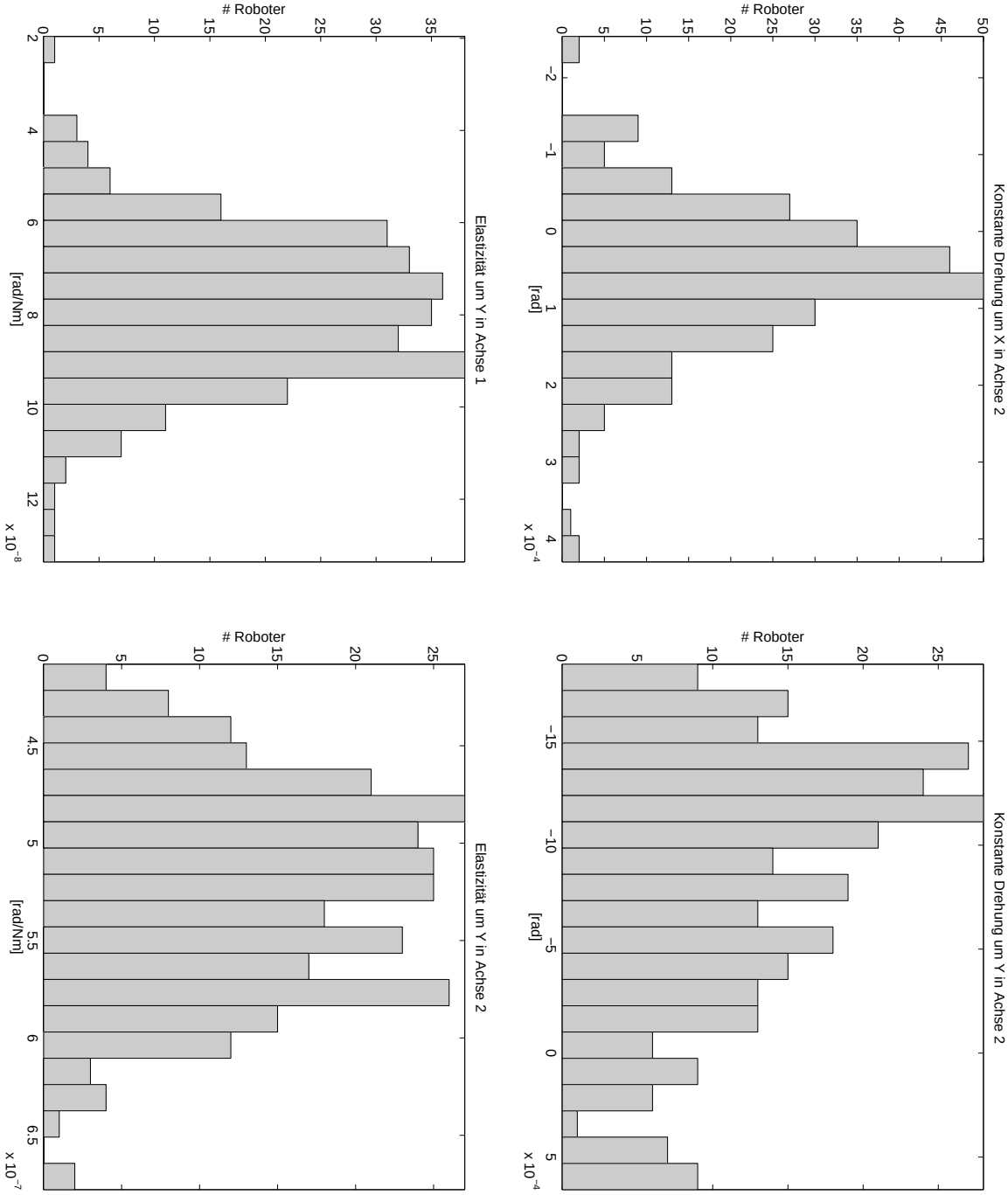
Anhang B

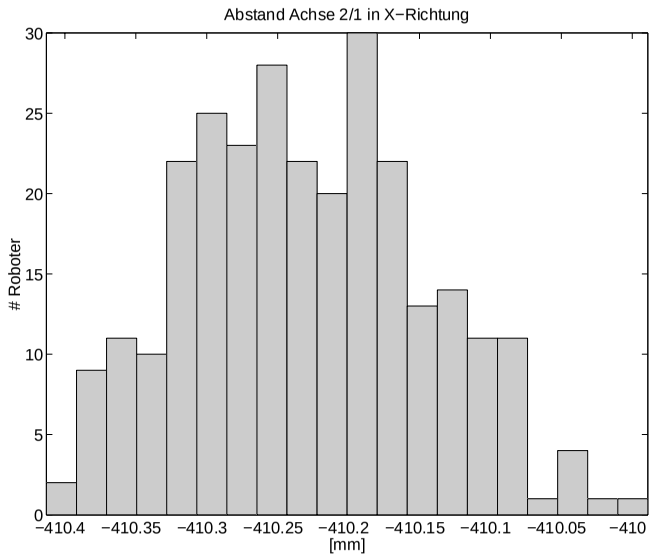
Parameterhistogramme

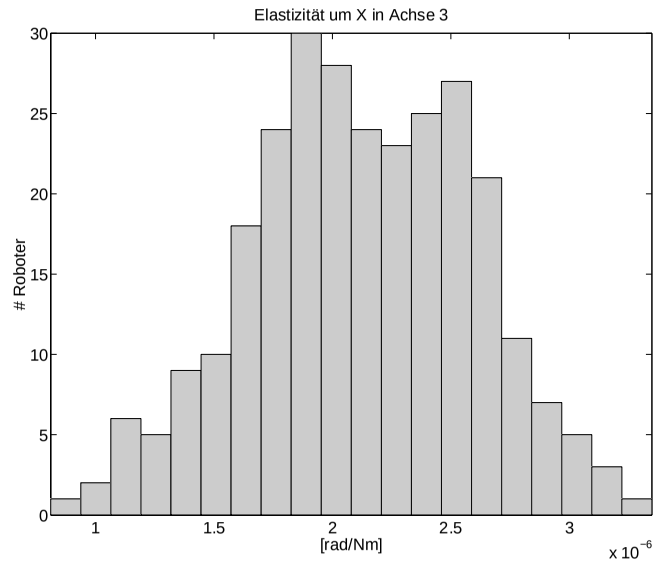
Im Folgenden werden die statistischen Verteilungen der 30 kinematisch relevanten Parameter aus Abschnitt 5.6.6 angegeben. Das Datenmaterial wurde aus 280 Kalibrierungen baugleicher Industrieroboter mit 6 rotatorischen Achsen erzeugt. Ein Vergleich mit den signifikant verschiedenen Parametern, die aus der Kalibrierung von insgesamt über 30 unterschiedlichen Kinematiken und baulich leicht modifizierten Industrierobotern gewonnen wurden, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

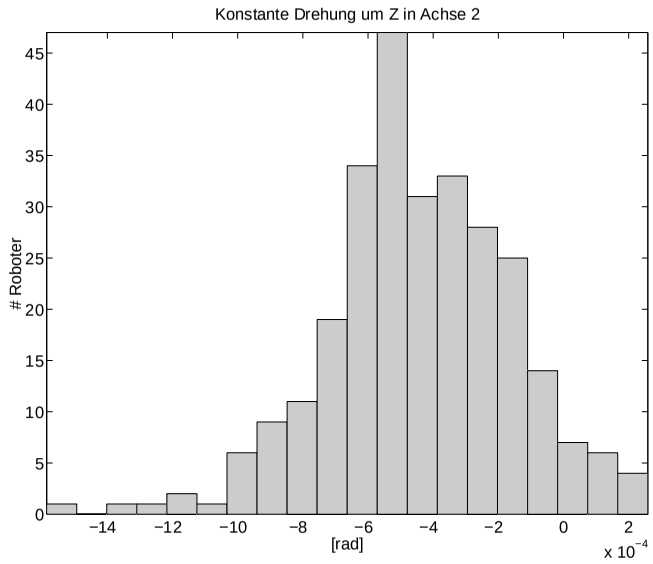


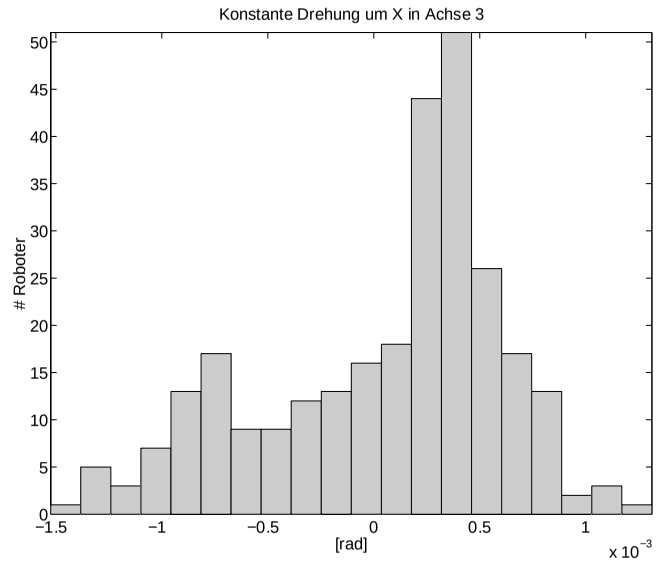


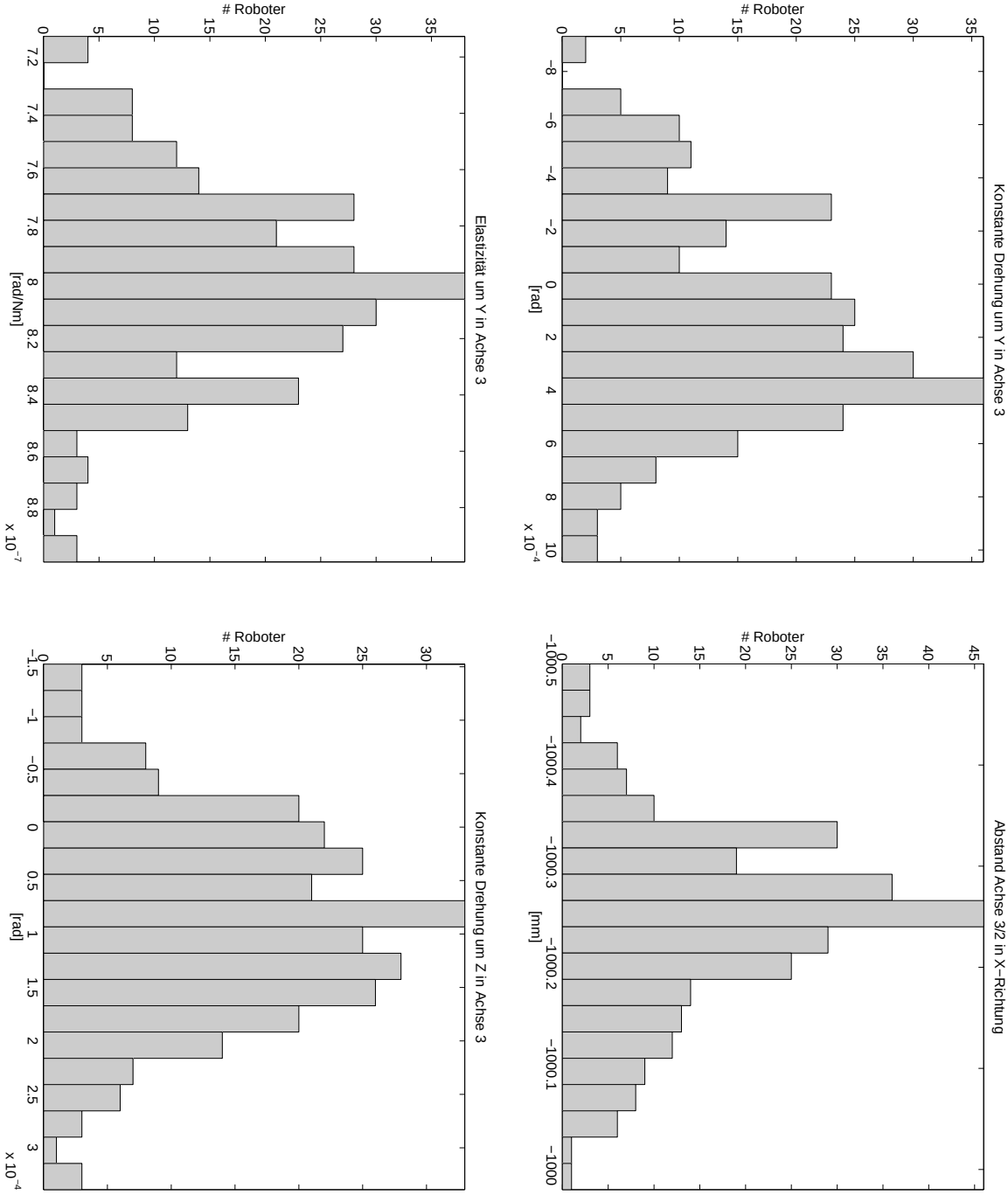

Konstante Drehung um X in Achse 2
Roboter
[rad]
x 10^-4
Elastizität um Y in Achse 1
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-8
Konstante Drehung um Y in Achse 2
Roboter
[rad]
x 10^-4
Elastizität um Y in Achse 2
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-7

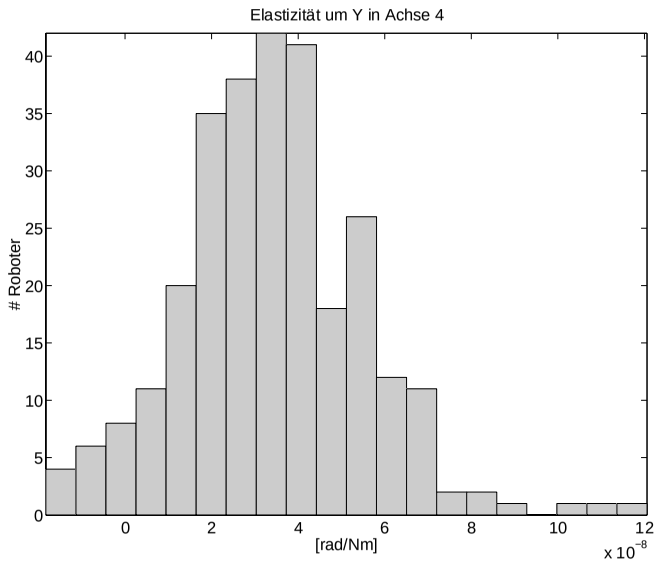

Abstand Achse 2/1 in X−Richtung
Roboter
[mm]
−410.4
−410.35
−410.3
−410.25
−410.2
−410.15
−410.1
−410.05
−410

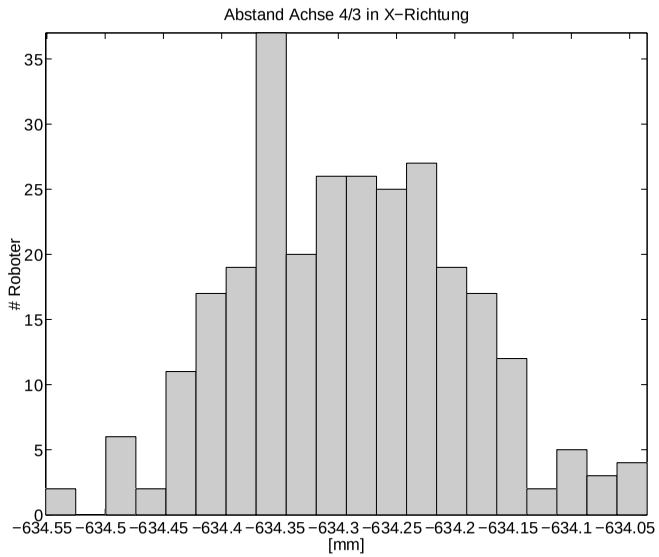

Elastizität um X in Achse 3
Roboter
[rad/Nm]
x 10^−6

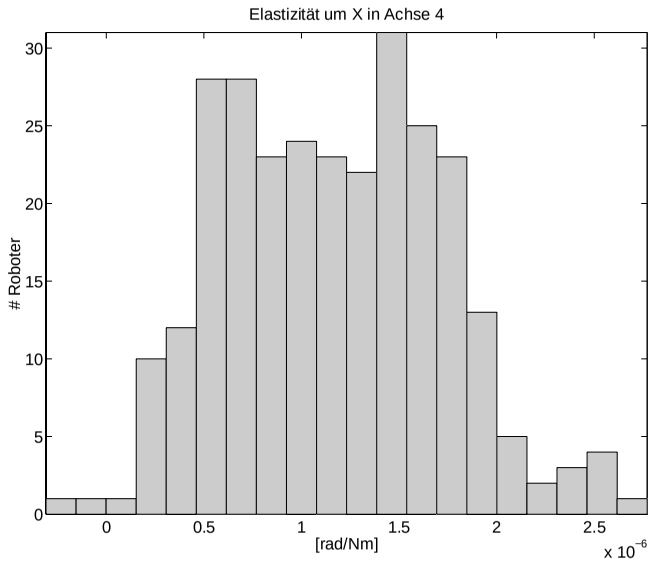

Konstante Drehung um Z in Achse 2
Roboter
[rad]
x 10^−4

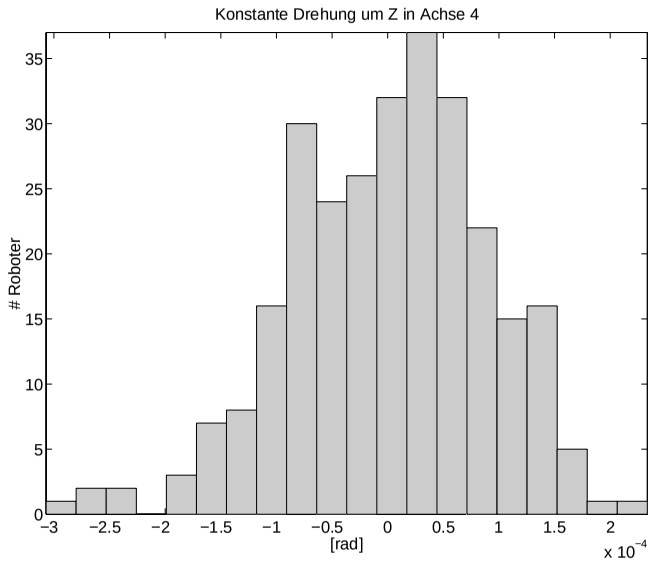

Konstante Drehung um X in Achse 3
Roboter
[rad]
x 10^−3

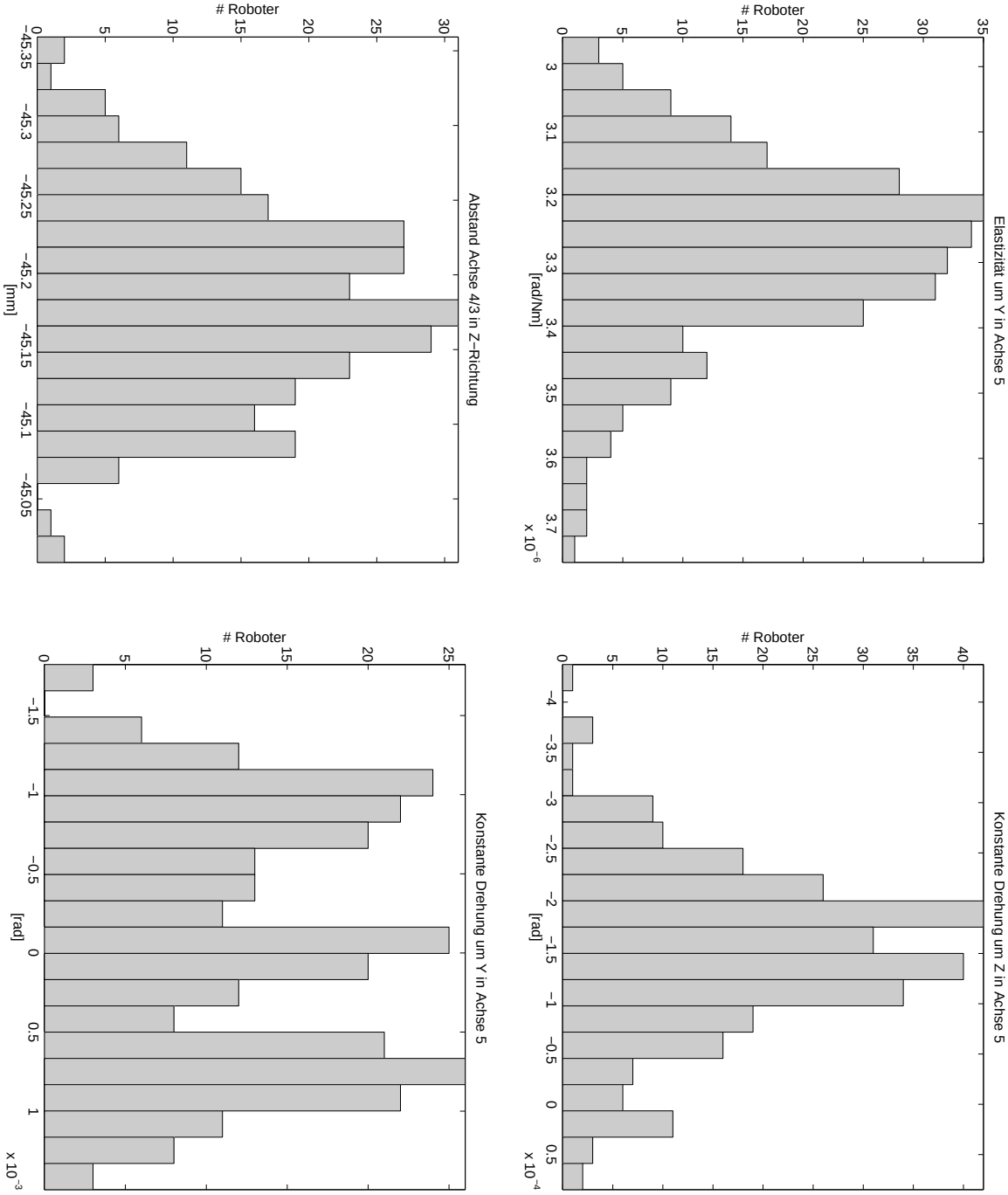

Konstante Drehung um Y in Achse 3
Roboter
[rad]
x 10^-4
Elastizität um Y in Achse 3
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-7
Abstand Achse 3/2 in X−Richtung
Roboter
[mm]
Konstante Drehung um Z in Achse 3
Roboter
[rad]
x 10^-4

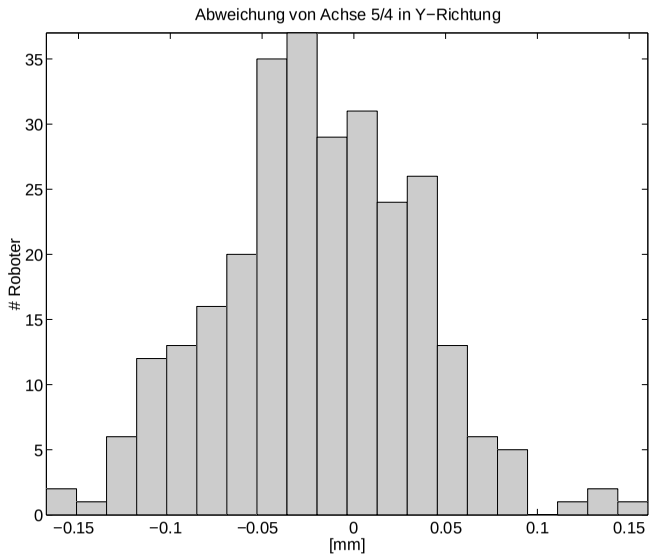

Elastizität um Y in Achse 4
Roboter
[rad/Nm]
x 10^−8

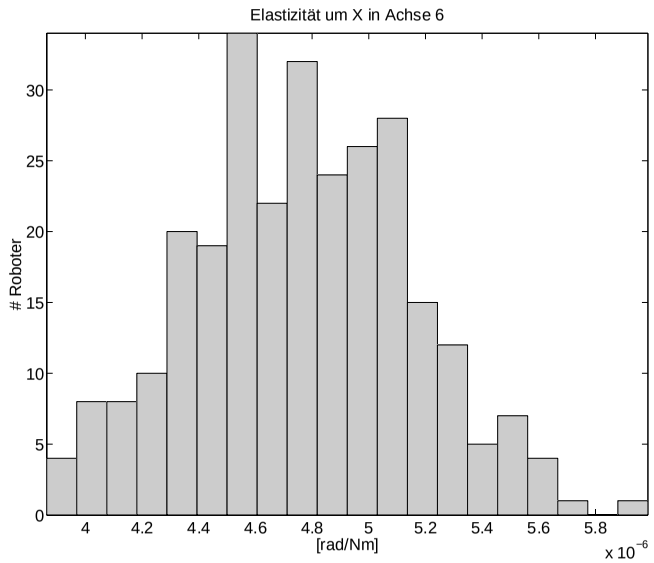

Abstand Achse 4/3 in X−Richtung
Roboter
[mm]

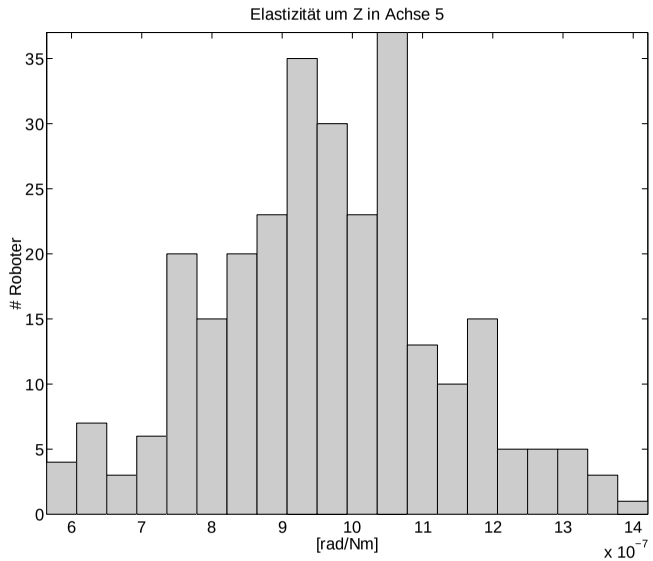

Elastizität um X in Achse 4
Roboter
[rad/Nm]
x 10^−6

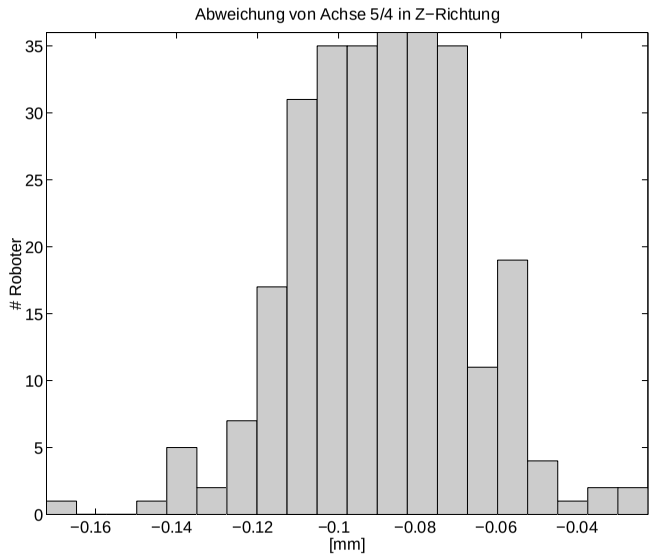

Konstante Drehung um Z in Achse 4
Roboter
[rad]
x 10^−4

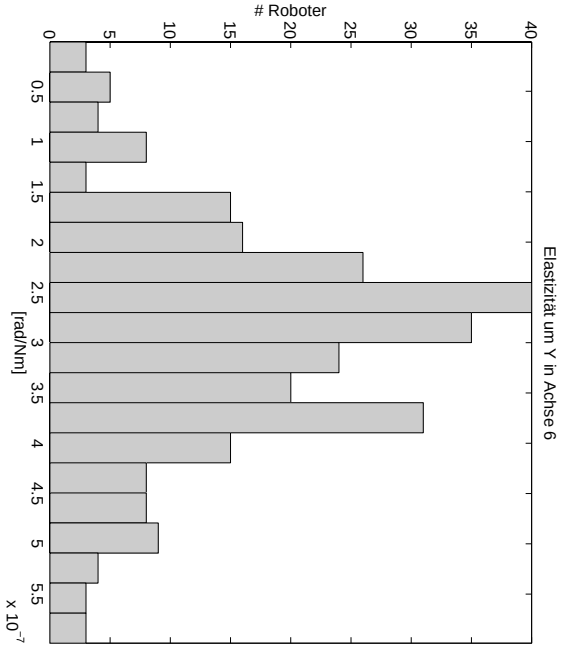

Elastizität um Y in Achse 5
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-6
Abstand Achse 4/3 in Z−Richtung
Roboter
[mm]
Konstante Drehung um Z in Achse 5
Roboter
[rad]
x 10^-4
Konstante Drehung um Y in Achse 5
Roboter
[rad]
x 10^-3

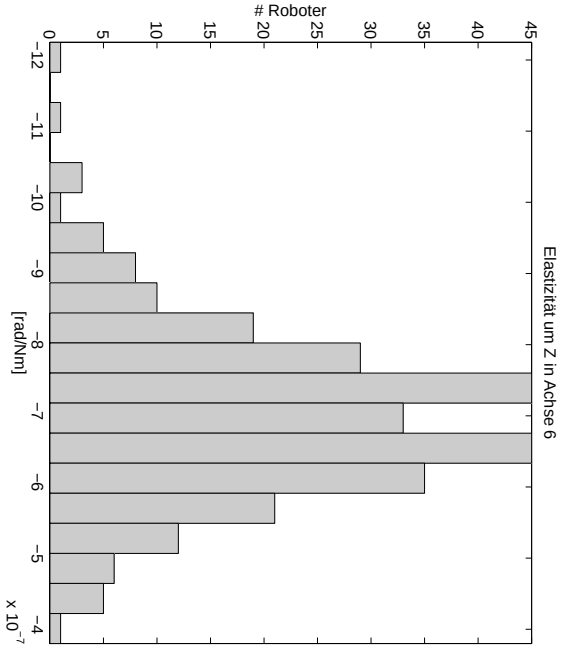

Abweichung von Achse 5/4 in Y−Richtung
Roboter
[mm]


Elastizität um X in Achse 6
Roboter
[rad/Nm]
x 10^−6


Elastizität um Z in Achse 5
Roboter
[rad/Nm]
x 10^−7


Abweichung von Achse 5/4 in Z−Richtung
Roboter
[mm]


Konstante Drehung um Y in Achse 6
Roboter
[rad]
x 10^-4


Elastizität um Y in Achse 6
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-7

Konstante Drehung um Z in Achse 6
Roboter
[rad]
x 10^-4

Elastizität um Z in Achse 6
Roboter
[rad/Nm]
x 10^-7

Literaturverzeichnis

[1] K. B. Atkinson
Close Range Photogrammetry and Machine Vision
Whittles Publishing, UK (1996)

[2] A. Behrens
Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern
Uniforschung, Forschungsmagazin der Univ. Hamburg, 2000, S17-26

[3] D.J. Bennett, J.M. Hollerbach
Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive end-point constraints
IEEE Trans. Robot. Automation 7, pp. 597-606, 1991

[4] John J. Craig
Introduction to Robotics
Addison-Wesley, Massachusetts (1986)

[5] B. Diewald
Über-alles-Kalibrierung von Industrierobotern zur lokalen Minimierung der Posefehler
Dissertation, Saarbrücken (1995)

[6] L.J. Everett, T.-W. Hsu
The Theory of Kinematic Parameter Identification for Industrial Robots
Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 110, S. 96-100 (1988)

[7] F. Geuens, u.a.
Standardisation of robotic cell calibration: the key to succesful integration of OLP
Proceedings of the 28th intern. symp. on robotics, Detroit, 1997, S. 5-25

[8] Ralf-Gunter Gräser
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
Dissertation an der Technischen Universität München (1999)

[9] U. Heisel et al.
Thermal behaviour of Industrial Robots and Possibilities for Error Compensation
CIRP Annals Vol. 46/1/1997, S 283-286

[10] F. Hirzebruch, W. Scharlau
Einführung in die Funktionalanalysis
Bibliographisches Institut, Mannheim (1988)

[11] John M. Hollerbach, Charles W. Wampler
The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods
The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 6, 1996, pp. 573-591

[12] H. Janocha, E. Hinüber, B. Diewald, R. Godding
Photogrammetricaly aided inertial measurement system for static and dynamic measurement and calibration of industrial robots
Industrial Robot (1995)

[13] D.J. Kruglinski
Inside Visual C++
Microsoft Press, Redmond, Washington (1997)

[14] K. Magnus, H. H. Müller
Grundlagen der Technischen Mechanik
Teubner, Stuttgart (1979)

[15] Th. Overbeck
Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Horizontal-Knickarm-Robotern
Dissertation, Hamburg (1992)

[16] F. Richter
Erfassung und Ausgleich thermisch bedingter Verformungen an Industrierobotern
Dissertation Tübingen (1997)

[17] W. Riechmann
Hochgenaue photogrammetrische on-line Objekterfassung
Dissertation, Braunschweig (1992)

[18] E. Roos
Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierter Roboterapplikationen
Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg (1998)

[19] K. Schröer
Identifikation von Kalibrationsparametern kinematischer Ketten
Dissertation, Technische Universität Berlin (1993)

[20] K. Schröer
Improvement of Robot Industrial Standardisation: IRIS
8th International Symposium on Measurement and Control in Robotics. Proceedings
Prag: Czech Technical University, 1998, S.335-340

[21] K. Schröer, L. Uhl, S. Albright, M. Hüttenhofer
Ensuring Solvability and Analyzing Results of the Nonlinear Robot Calibration Problem
Proc. of the 2nd Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics, Japan, 1992, S. 851-858

[22] K. Schröer, S.L. Albright, A. Lisounkin
Modeling Closed-Loop Mechanisms in Robots for Purpose of Calibration
IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No 2, S. 218-229 (1997)

[23] H. R. Schwarz
Numerische Mathematik
Teubner, Stuttgart (1993)

[24] B. Stroustrup
Die C++ Programmiersprache
Addison-Wesley, Bonn (1992)

[25] W. Wester-Ebbinghaus
Opto-elektronische Festkörper-Flächensensoren im photogrammetrischen Abbildungssystem
BuL, Heft 6, S. 297-301, 1994

[26] U. Wiest, S. Pieters
Flexible Inline Meßtechnik mit kalibrierten Industrierobotern
Robotik 2000, VDI Berichte 1552, Berlin (06/2000)