

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens und der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Herkömmliche Koordinatenmesstechnik . . . . .	3
2.1.1 Grundprinzip . . . . .	3
2.1.2 Standardkinematik und Standardmesskonzepte . . . . .	8
2.1.3 Andere Kinematiken . . . . .	11
2.2 Messen mit Industrierobotern . . . . .	16
2.3 Kalibrierung . . . . .	23
2.3.1 Kinematische Modellierung . . . . .	27
2.3.1.1 Starrkörpermodelle für ideale Gelenke . . . . .	28
2.3.1.2 Starrkörpermodelle für nichtideale Gelenke mit einem Freiheitsgrad . . . . .	31
2.3.1.3 Getriebemodelle . . . . .	34
2.3.1.4 Elastizitätsmodelle . . . . .	34
2.3.1.5 Fehlerkompensationsmodelle auf Wertetabellenbasis . . . . .	35
2.3.1.6 Sonstige Modelle . . . . .	36
2.3.2 Ausgleichsrechnung . . . . .	37
2.3.3 Partielle Poseinformationen . . . . .	38
2.3.4 Prinzip der kinematischen Schleife . . . . .	39
2.3.5 Taxonomie von Hollerbach und Wampler . . . . .	40
2.3.6 Messtechnisches Schließen der kinematischen Kette . . . . .	42
2.3.7 Selbstkalibrierung mit Kalibrierkörpern . . . . .	43
2.3.8 Werkzeugkalibrierung . . . . .	46

2.3.9	Messkopfkalibrierung . . . . .	47
2.4	Visual Servoing . . . . .	48
2.5	Sensorregelung . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Ziel und Vorgehensweise</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>Grundlagen einer verallgemeinerten Koordinatenmesstechnik</b>	<b>59</b>
4.1	Formelemente . . . . .	59
4.1.1	Die Spezielle Euklidische Gruppe . . . . .	59
4.1.2	Mannigfaltigkeiten . . . . .	61
4.1.3	Parametrisierungen der Speziellen Euklidischen Gruppe . . . . .	63
4.1.4	Symmetriegruppe eines Formelements . . . . .	64
4.1.5	Verallgemeinerte Koordinaten . . . . .	65
4.1.6	Systematische Herleitung der Formelementtypen . . . . .	67
4.1.7	Formelement-Beispiele . . . . .	70
4.1.8	Restringierte Formelemente . . . . .	71
4.2	Das allgemeine Koordinatenmessgerät . . . . .	72
4.3	Messender Messkopf . . . . .	74
4.3.1	Die Messrelation . . . . .	74
4.3.2	Projektionen und Selektionen . . . . .	74
4.3.3	Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten mit messendem Messkopf . . . . .	78
4.3.4	Beispiel: Zweiachs-Roboter erfasst Abstand zu einem Punkt auf einer Geraden . . . . .	82
4.3.5	Beispiel: Kartesisches KMG mit messendem Kugelmesstaster . . . . .	84
4.3.6	Beispiel: Lageerfassung eines Prismas mit vier Laser- triangulationssensoren . . . . .	85
4.4	Schaltender Messkopf . . . . .	86
4.4.1	Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten mit schaltendem Messkopf . . . . .	87
4.4.2	Mehrere Schaltbedingungen . . . . .	89
4.4.3	Beispiel: Kartesisches Koordinatenmessgerät mit schaltendem Kugelmesstaster . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Messkonzept für Koordinatenmessroboter</b>	<b>93</b>
5.1	Beurteilung der herkömmlichen Messkonzepte . . . . .	94

5.2	Messender Messkopf im Schaltbetrieb . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Antastregelung</b> . . . . .	<b>99</b>
6.1	Modellierung der Regelstrecke . . . . .	100
6.2	Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	102
6.3	Redundante Messkopf-Freiheitsgrade . . . . .	104
6.4	Reglerauswahl . . . . .	105
6.5	Bestimmung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	105
6.5.1	Abhängigkeit der Messwert-Jacobi-Matrix von der Messkopfpose und der Formelementlage . . . . .	106
6.5.2	Analytische Herleitung . . . . .	107
6.5.3	Konstante Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	109
6.5.4	Automatische Ermittlung der zum Sollmesswert gehörigen Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	111
6.6	Festlegung der Reglerverstärkung . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Kalibrierung</b> . . . . .	<b>115</b>
7.1	Selbstkalibrierung mit Kalibrierkörpern . . . . .	118
7.2	Zwangsbedingungen . . . . .	119
7.3	Lösungsfindung . . . . .	122
7.4	Neuermittlung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	127
7.5	Messkopfkalibrierung mit einem herkömmlichen Koordinatenmessgerät . . . . .	127
7.6	Werkzeugkalibrierung . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Messunsicherheit</b> . . . . .	<b>129</b>
8.1	Annahme- und Bestätigungsprüfung . . . . .	133
8.2	Experimentelle Ermittlung der aufgabenspezifischen Mess- und Positionierunsicherheit . . . . .	137
<b>9</b>	<b>Koordinatenmessroboter-Framework</b> . . . . .	<b>141</b>
9.1	Framework-Architektur . . . . .	144
9.2	Parametrisierungen für Formelemente . . . . .	148
9.3	Kinematische Modellierung . . . . .	151
9.4	Einschränkung des Arbeitsraums . . . . .	156
9.5	Antastregelung . . . . .	157
9.5.1	Messkopfgeschwindigkeit als Stellwert . . . . .	160

---

9.5.2	Gelenkgeschwindigkeiten als Stellwerte . . . . .	161
9.5.3	Kumulative Bahnkorrektur . . . . .	162
9.5.4	Absolute Bahnkorrektur . . . . .	166
9.5.5	Static-Look-And-Move . . . . .	168
9.6	Automatische Bestimmung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	170
9.7	Eingabe der Zwangsbedingungen . . . . .	172
9.8	Selbstkalibrierung . . . . .	174
<b>10</b>	<b>Herstellung von Nietbohrungen in der Flugzeugrumpfmontage</b>	<b>179</b>
10.1	Mess- und Bearbeitungsaufgabe . . . . .	181
10.2	Roboter . . . . .	182
10.3	Messkopf . . . . .	183
10.4	Antastregelung . . . . .	186
10.5	Kalibrierung mit einem herkömmlichen Koordinatenmessgerät . . . . .	187
10.6	Selbstkalibrierung . . . . .	188
10.7	Ermittlung des Bohrer-TCPF . . . . .	191
10.8	Ermittlung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	195
10.9	Bestimmung der Unsicherheiten . . . . .	196
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>199</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>