

„Effiziente robotergestützte Messtechnik durch intelligente Sensorausrichtung“

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Mönning

aus

Haselünne

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (BR) Prof. h.c. (TJ) Dr.h.c. Tilo Pfeifer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 28. August 2006

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

I Inhalt

I	Inhalt	I
II	Kurzzeichen	III
III	Formelzeichen	IV
1	Einleitung	1
2	Die fertigungsintegrierte Messtechnik in der Produktion	3
2.1	Rahmenbedingungen der fertigungsintegrierten Messtechnik	3
2.2	Stand der Technik und Forschung robotergestützter Messsysteme	11
2.2.1	Positioniergenauigkeit von Industrierobotern	22
2.2.2	Methoden zur Genauigkeitssteigerung von Messrobotern	24
2.2.3	Messsysteme zur Bestimmung der Roboterpose	26
2.2.4	Programmierung von Robotern	27
2.2.5	Messprogrammerstellung	30
2.2.6	Fehlende Möglichkeit der Nahbereichsprogrammierung	31
2.3	Zwischenfazit	35
3	Zielsetzung und Lösungskonzept	37
4	Lagebestimmung durch Auswerten der Schärfentiefe	39
4.1	Entwurf und Design des Systems.....	39
4.2	Prinzip der Schärfentiefeauswertung.....	41
4.3	Vorgehensweise zur Auswertung der Schärfentiefe	44
4.4	Auswertung der Fokussierung.....	47
4.4.1	Bestimmung des Fokusverlaufes.....	53
4.4.2	Bewertung der fokussuchenden Verfahren.....	54
5	Kalibrierung des intelligenten Stativs	59
5.1	Intrinsische und extrinsische Kamerakalibrierung.....	60
5.1.1	Pixelbasierte Segmentierung.....	62
5.1.2	Identifikation der Startpunkte über Grauwerte	63
5.1.3	Identifikation der Startpunkte über geometrische Kriterien.....	66
5.1.4	Ergebnisse der Kalibrierung	68
5.2	Kalibrierung der Schärfentiefe.....	71
5.3	Kalibrierung der Kamera-Roboter-Beziehung.....	75

5.3.1	Koordinatensysteme und Vorgehensweise.....	75
5.3.2	Bestimmung der Transformationsmatrix X durch Optimierungsverfahren	78
6	Roboterlageregelung unter Nutzung des Schärfentiefeeffektes	81
6.1	Positionsbasierte Regelung.....	81
6.2	Bildbasierte Regelung	84
6.2.1	Konzept und Regelentwurf	84
6.2.2	Realisierung der Benutzer-Schnittstelle	90
6.2.3	Beleuchtungskonzept bei spiegelnden Oberflächen	91
6.2.4	Bewertung der implementierten Lösung	95
7	Das Intelligente Stativ in der Anwendung.....	101
7.1	Messunsicherheit und Prüfprozesseignung.....	102
7.1.1	Konzept zur Bestimmung der Messunsicherheit	105
7.1.2	Lokale Messunsicherheit des optischen Sensors	107
7.1.3	Prüfkörper zur Bestimmung der lokalen Messunsicherheit	108
7.1.4	Eindeutige Definition der Messaufgabe	109
7.2	Anwendung in der Karosseriemesstechnik.....	112
7.3	Anwendung des Intelligenten Stativs in der Mikrosystemtechnik.....	116
7.3.1	Prototyp eines robotergeführten Mikroskops	117
7.3.2	Bestimmung des Fokusverlaufs mit dem Mikroskop	120
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	123
9	Abbildungsverzeichnis.....	125
10	Literatur.....	131
10.1	Veröffentlichungen	131
10.2	Normen und Richtlinien.....	138