

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	v
1 Einleitung	1
2 Geometrische Messtechnik	4
2.1 Taktile 3D-Koordinatenmesstechnik	4
2.2 Optische 3D-Koordinatenmesstechnik	5
2.2.1 Triangulationssensoren	6
2.2.1.1 Aktive Triangulationsverfahren	6
2.2.1.2 Passive Triangulationsverfahren	9
2.2.2 Laufzeitmessung	10
2.2.3 Interferometrische Verfahren	11
2.3 Andere geometrische Messsysteme	12
3 Streifenprojektionssystem	14
3.1 Optische Eigenschaften	15
3.1.1 Optische Abbildung	15
3.1.1.1 Schärfentiefe	16
3.1.2 Reflexionen an Oberflächen	17
3.1.3 Modulationsübertragungsfunktion	18
3.2 Kamera	19
3.2.1 Kamerasensor	19
3.2.2 Digitalisierung und Framegrabber	22
3.3 Projektor	23
3.3.1 Lichtquelle	23
3.3.2 Lichtmodulatoren	23
3.3.3 Anbindung des Projektors	25
3.3.4 Kodierte Beleuchtung	26
3.3.4.1 Binäre Kodierung	26

3.3.4.2	Analoge Kodierung	28
3.3.4.3	Hybride Kodierung	31
3.4	Messung und Auswertung	32
3.4.1	Triangulationswinkel	32
3.4.2	Korrespondenz und Koordinatenbestimmung	33
3.4.3	Bildverarbeitung bei Kreismarken	35
3.4.4	Messergebnis	37
3.5	Anwendungen	39
4	Virtuelles Streifenprojektionssystem	41
4.1	Mathematisches Modell	42
4.1.1	Räumliche Koordinatentransformationen	43
4.1.2	Räumliche Koordinatensysteme	44
4.1.3	Projektionen des 3D-Raumes in eine 2D-Ebene	45
4.1.4	Bildebene und Sensorkoordinaten	48
4.1.5	Pixel- und Subpixelkoordinaten	52
4.1.6	Vollständige Projektion	54
4.1.7	Besonderheiten beim Projektor	55
4.2	Quadrik	55
4.3	Simulationsprogramm VFPS (Virtual Fringe Projektion System)	56
4.3.1	Konfiguration	57
4.3.2	Diskretisierung eines Objektes	58
4.3.3	Ablauf einer Simulation	59
5	Kalibrierverfahren	62
5.1	Ausgleichsprobleme	64
5.1.1	Lineare Ausgleichsrechnung	65
5.1.2	Nichtlineare Ausgleichsrechnung	68
5.2	Black-Box Kalibrierverfahren	69
5.2.1	Polynomverfahren	70
5.2.1.1	Verfahren I	71
5.2.1.2	Verfahren II	72
5.2.1.3	Verfahren III	73
5.2.1.4	Berechnung der Polynomkoeffizienten	73
5.2.2	Neuronale Netze	74
5.2.2.1	Backpropagationnetze	77

5.2.2.2	Radiale Basisfunktionen-Netze	78
5.3	Modellbasierte Kalibrierverfahren	80
5.3.1	Kamerakalibrierung	82
5.3.1.1	Projektive Geometrie	83
5.3.2	Direkte lineare Transformation	86
5.3.3	Photogrammetrische Bündelausgleichung	86
6	Messunsicherheit und Simulation	92
6.1	Messunsicherheit nach GUM	92
6.2	Monte-Carlo Methoden	94
6.3	Messabweichungen und Einflussfaktoren	97
6.3.1	Optische Einflussfaktoren	97
6.3.2	Software und Algorithmen	98
6.3.3	Elektronische Faktoren	99
6.3.4	Mechanische Komponenten	100
6.3.5	Rauschen und Temperaturänderungen	100
7	Simulationsergebnisse	102
7.1	Ideales Streifenprojektionssystem	104
7.2	Optische Verzeichnungen	108
7.3	Statistische Modellierung anhand der Passpunkte	111
7.4	Statistische Modellierung der Systemparameter	113
8	Zusammenfassung	117
	Literaturverzeichnis	119
A	Anhang	125
A.1	Projektive Geometrie	125
A.2	Pseudoinverse	126