

Dipl.-Ing. Markus Müller, Wuppertal

**Ein Konzept  
für dreidimensionales  
Maschinensehen  
durch aktive  
Objektextraktion mittels  
kreisrasterförmiger  
strukturierter Beleuchtung**

Reihe **10**: Informatik/  
Kommunikationstechnik Nr. **507**

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen</b>	<b>VIII</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole</b>	<b>IX</b>
<b>1. Einleitung, Stand der Technik und das Maschinensehenkonzept</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation der Forschungsarbeit	2
1.2. Stand der Technik und Überblick	3
1.2.1. Szenenerfassung	6
1.2.2. Datenrepräsentation	18
1.2.3. 3D-Szeneninterpretation	21
1.3. Zielsetzung und das Maschinensehenkonzept	30
<b>2. Das grundlegende Konzept für Maschinensehen</b>	<b>38</b>
2.1. Szeneninterpretation: Objekterkennung und Lagebestimmung	39
2.1.1. Konzept für die flächenbasierte Objekterkennung	40
2.1.2. Merkmale für die Objekterkennung (Objektmerkmale)	43
2.1.3. Der Algorithmus für die flächenbasierte Objekterkennung	48
2.1.4. Bestimmung der Objektlage	53
2.2. Erfassung der Elementarmerkmale einer Szene: Das Verfahren zur 3D-Szenenerfassung mit kreisrasterförmiger strukturierter Beleuchtung	53
2.2.1. Prinzip der Szenenerfassung mittels kreisrasterförmiger strukturierter Beleuchtung	54
2.2.2. Flächenbasierte Szenenerfassung mit strukturierter Beleuchtung	55
2.2.3. Geometrische Beschreibung von Kreis Kegeln und Ellipsen als Elemente der Lichtstruktur	57
2.2.4. Ermittlung der Ebenenparameter bei fehlerfreier Messung	63
2.2.5. Ermittlung der Ebenenparameter bei fehlerbehafteter Messung	69
2.2.6. Bestimmung der Ellipsenidentitäten	71
2.3. Synthese der Szenenflächen aus den Flächenfragmenten	72
2.3.1. Zusammenfassung der Fragmente zu vorläufigen Szenenflächen	73
2.3.2. Aufteilung der vorläufigen Szenenflächen in zusammenhängende Szenenflächen	74
2.4. Zusammenfassung	76
<b>3. Realisierung des Maschinensehens für flexible Kameraführung</b>	<b>78</b>
3.1. Struktur des Gesamtsystems für die 3D-Szenenanalyse	80
3.2. Bilderfassung	83
3.3. Bildvorverarbeitung	84

3.3.1. Bildverbesserung durch Bildverknüpfung	84
3.3.2. Einfluß der Defokussierung	86
3.4. Erfassung der Ellipsenkonturen	86
3.4.1. Binärisierung und Konturierung mittels OKE-Verfahren	86
3.4.2. Bereichswachstumsverfahren	87
3.5. Extraktion der Ellipsenmerkmale	88
3.5.1. Extraktion der geometrischen Ellipsenparameter	88
3.5.2. Bestimmung der Ellipsenidentitäten	95
3.6. Bestimmung der dreidimensionalen Flächenfragmente mittels ACI-Verfahren	96
3.7. Synthese der dreidimensionalen Szene aus den Flächenfragmenten	99
3.7.1. Zusammenfassung der Flächenfragmente zu Szenenflächen	99
3.7.2. Gruppierung der einzelnen Szenenflächen zu Objekten	100
3.8. Objekterkennung und Lagebestimmung	100
3.9. Quantitative Bewertung der Ergebnisse des KSB-Verfahrens	112
3.9.1. Lage der Flächenfragmente in den Szenenflächen	113
3.9.2. Relative Lage der Szenenflächen	120
3.9.3. Relative Lage der Objekte	123
3.10. Grundlagen für die Entscheidung zugunsten einer Interpretationsalternative und Strategien für die Szenenerfassung	126
3.11. Zusammenfassung	130
<b>4. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
<b>Anhang A: Mathematischer Anhang</b>	<b>136</b>
A.1 Geometrie von Ellipsen	136
A.1.1 Geometrische Ellipsenparameter	136
A.1.2 Bestimmung der geometrischen Ellipsenparameter aus den Koeffizienten der Ellipsengleichung	137
A.1.3 Normierungsbedingung für die LS-Schätzung der Ellipsenparameter	140
A.1.4 Abschätzung des mittleren Strahlabstands aus dem Residuum der LS-Schätzung der Ellipsenparameter	142
<b>Anhang B: Digitale Bildverarbeitung</b>	<b>144</b>
B.1 Bildverbesserung durch Bildverknüpfung	144
B.2 Untersuchung des Einflusses der Defokussierung	147
B.3 C-VIS - Ein objektorientiertes Programmpaket für die digitale Bildverarbeitung	150
<b>Anhang C: Verfahren zur 3D-Szenenanalyse</b>	<b>152</b>
C.1 Kalibrierung der Projektor/Kameraanordnung	152
C.1.1 Kameramodell	152
C.1.2 Projektormodell	155
C.1.3 Geometrische Anordnung Projektor / Kamera	155

---

C.1.4 Kalibrierung der Anordnung Projektor / Kamera	155
C.1.5 Kalibrierung der Kamera am Roboter	156
C.2 Aufteilung der vorläufigen Szenenflächen bei nichtkonvexen Objekten	157
C.3 Definition der Merkmale für die Objekt und Flächenzuordnung	160
C.3.1 Globale Merkmale einer Modellbasis	161
C.3.2 Globale Merkmale eines Modellobjekts	162
C.3.3 Globale Merkmale einer Referenzflächenkombination	164
C.3.4 Lokale Merkmale	165
C.3.5 Relative Merkmale	166
C.3.6 Absolute Merkmale	170
C.4 Interpretationsbäume für das Modellobjekt „Tetraeder“	172
<b>Anhang D: Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>174</b>
D.1 Ergebnisse des KSB-Verfahrens	174
D.1.1 Abstandsfehler der Fragmente bezüglich der Szenenfläche	174
D.1.2 Lateraler Fehler der Fragmente bezüglich des zu erwarteten Lichtmusters	178
D.1.3 Winkelfehler der Fragmente bezüglich der Szenenfläche	182
D.2 Ergebnisse der Szeneninterpretation	188
D.2.1 Referenzmerkmale der Modellbasis	188
D.2.2 Szenenmerkmale für Testszene 1	195
D.2.3 Alternativen der Szeneninterpretation für Testszene 3	198
D.2.4 Alternativen der Szeneninterpretation für Testszene 4	201
D.3 Rechenzeiten der Teilschritte des Verfahrens	204
<b>Anhang E: Erfassung der dreidimensionalen Szene durch die Roboterkamera</b>	<b>206</b>
E.1 Der Roboter-Kameraarm	206
<b>Literatur</b>	<b>208</b>