

# CAD-basierte Objekterkennung für ein multisensorielles Meßsystem

Jan Böhm, Claus Brenner, Jens Gühring, Dieter Fritsch

Institut für Photogrammetrie  
Universität Stuttgart  
Geschwister-Scholl-Straße 24, 70174 Stuttgart  
*vorname.nachname@ifp.uni-stuttgart.de*

**Zusammenfassung** An der Universität Stuttgart wird im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs an einem System zur explorativen Erkennung und Vermessung von Werkstücken geforscht. Ein Ziel der Arbeiten ist der Aufbau eines Gesamtsystems, bestehend aus Beleuchtung, Aktoren, optischen Sensoren und Auswertalgorithmen, welches in der Lage ist, ein eingelegtes Werkstück zu erkennen, dessen Position und Orientierung zu ermitteln und anschließend für dieses Teil spezifische, vordefinierte Meß- und Prüfaufgaben durchzuführen. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Automatisierung und Robustifizierung der Objekterkennung, welche den Einsatz des Meßsystems für verschiedene Werkstücke ermöglicht.

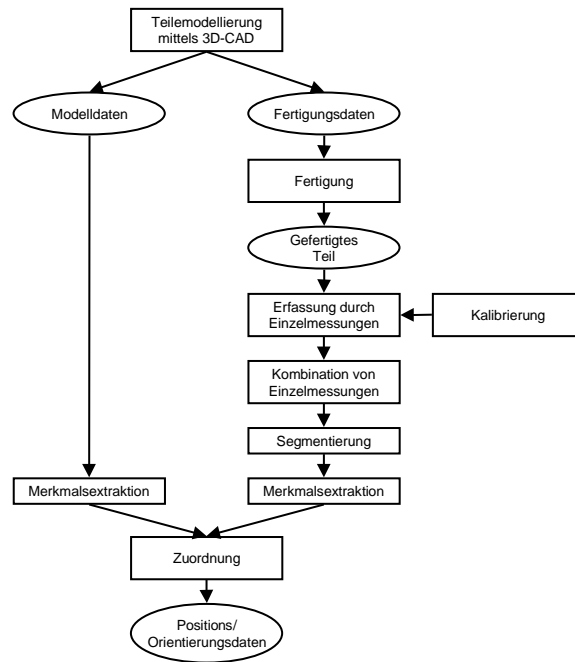
In diesem Beitrag zeigen wir die durchgängige Kette von der Modellierung eines Objekts mittels eines 3D-CAD-Systems über die Fertigung des Teils, die Erfassung und Segmentierung bis hin zur Erkennung dieses Objekts auf.

## 1 Einführung

Produktionsmethoden für industriell gefertigte Güter haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend gewandelt. Die Ursachen hierfür liegen in einer Veränderung der Anforderungen an eine moderne Produktion. Zum einen läßt sich feststellen, daß die Komplexität der gefertigten Teile im allgemeinen zunimmt. Zum anderen werden Modellzyklen immer kürzer, Serien kleiner, und der "time-to-market"-Aspekt immer wichtiger. Dies bedeutet, daß immer komplexere Teile in immer weniger Zeit konstruiert und gefertigt werden müssen.

Diese Entwicklung wird in allen Produktzyklen unterstützt durch neue Verfahren und Werkzeuge, die eine hohe Flexibilisierung erlauben. Als Stichworte seien 3D featurebasierte CAD-Systeme, Simulationsverfahren, rapid prototyping und frei programmierbare Universalroboter genannt.

Bei der Kontrolle der gefertigten Teile kann die in der Produktion zunehmend eintretende Flexibilisierung noch nicht in dem gewünschten Maße beobachtet werden. Noch immer werden Teile auf korrekte Geometrie überprüft, indem sie mit Lehren verglichen werden. Diese Lehren müssen spezifisch für jedes zu kontrollierende Teil angefertigt werden und stellen so einen erheblichen Kostenfaktor dar. Alternativ können einzelne Teile aus der Produktion entnommen und

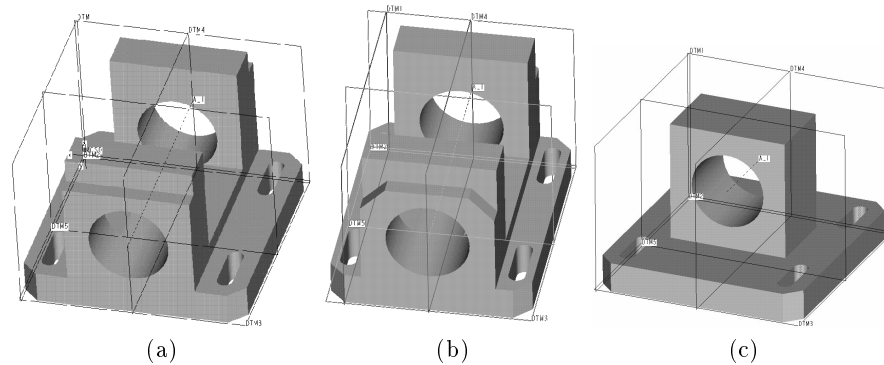


**Abbildung1.** Übersicht über das gewählte Vorgehen zur Teileerkennung.

mit allgemeinen Meßapparaturen, z.B. Koordinatenmeßmaschinen, unter relativ hohem Zeitaufwand überprüft werden. Gegen diesen Ansatz spricht jedoch die zunehmende Forderung nach einer 100%-Teilekontrolle.

Optische Techniken ermöglichen das genaue Messen von einigen hunderttausend Punkten innerhalb weniger Sekunden und bieten damit die Aussicht, wirtschaftliche 100%-Teilekontrolle auch bei kleinen Serien durchzuführen. Die mechanische Lehre wird dabei durch eine "virtuelle Lehre" in Form eines Modells im Rechner ersetzt. Idealerweise werden dabei alle für die Erkennung und Kontrolle des Teils erforderlichen Modelle automatisch aus den CAD-Modellen abgeleitet.

Abb. 1 zeigt die von uns gewählte Realisierung eines Systems zur Erkennung von Teilen auf der Basis von 3D-CAD-Modellen. Das CAD-System liefert sowohl Fertigungsdaten (welche z.B. direkt in eine rapid prototyping-Maschine eingelesen werden können) als auch Modelldaten, welche für die Objekterkennung geeignet sind. Das gefertigte Teil wird zur Kontrolle einer 3D-Datenerfassung unterzogen. Wie nachfolgend beschrieben, werden Einzelmessungen zusammengefügt, trianguliert, segmentiert und Merkmale für die Objekterkennung werden extrahiert. Im letzten Schritt wird eine Objekterkennung basierend auf den Merkmalen des CAD-Objektmodells und der segmentierten Meßdaten durchgeführt. Durch sie kann die globale Transformation des Objektmodells in die Szene bestimmt werden.



**Abbildung 2.** (a) Teil “Halter 1”, konstruiert mittels dem CAD-System Pro/ENGINEER. (b) “Halter 2”, mit geringfügigen Modifikationen. (c) “Halter 3”, wesentlich verschieden.

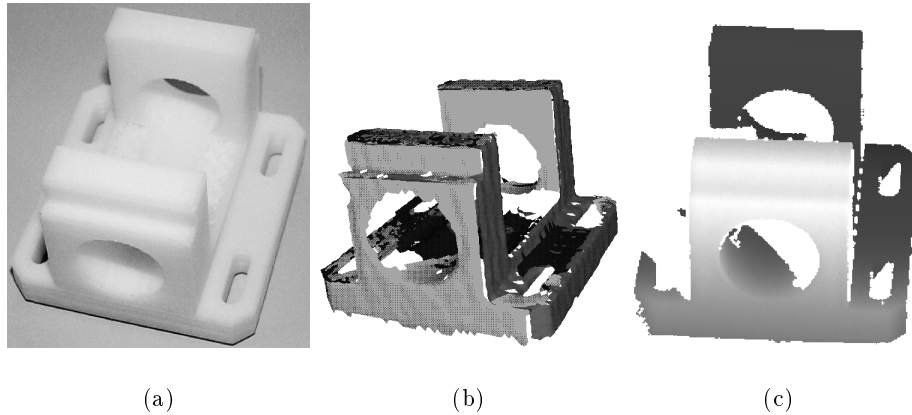
## 2 Modellierung und Fertigung

Unter Verwendung des CAD-Systems Pro/ENGINEER wurde ein fiktives Teil “Halter 1” in 3D konstruiert. Die Abmessungen betragen  $75 \times 70 \times 50\text{mm}^3$ . Des weiteren wurden die Objekte “Halter 2” und “Halter 3” konstruiert, welche vom Teil “Halter 1” geringfügig und wesentlich verschieden sind (Abb. 2). Das Teil “Halter 1” wurde von einer rapid prototyping-Maschine der Firma Stratasys, Inc. unter Verwendung der 3D-Daten aus dem CAD-System gefertigt (Abb. 3(a)). Die Maschine baut das Objekt in Schichten, die durch Auspressen von ABS-Kunststoff aus einer kleinen Düse erzeugt werden (fused deposition modeling). Schichtdicken bis herunter zu 0.1 mm können erzielt werden.

## 3 Datenerfassung und Registrierung

Von dem gefertigten Objekt wurden Distanzdaten gewonnen mittels eines Streifenprojektors [1] und einer Kamera. Das System arbeitet mit dem Codierte Lichtansatz, bei dem Punktkorrespondenzen durch Auswertung einer Bildsequenz ermittelt werden [2, 8]. Durch die relativ geringe Komplexität des Verfahrens sind Auswertegeschwindigkeiten von einigen hunderttausend gemessenen 3D-Punkten pro Sekunde auf Standardrechnern erreichbar. Eine photogrammetrische Kalibrierung des Systems wird in [4] beschrieben.

Die insgesamt 13 Einzelmessungen wurden mittels Standardsoftware [3, 7] registriert und in eine einzige, triangulierte Oberfläche überführt. Für das Teil “Halter 1” erhielten wir ein Modell aus 34,000 Dreiecken (Abb. 3(b)). Obwohl die Zahl von 13 Einzelmessungen hoch erscheinen mag, ist eine vollständige Erfassung der Objektfläche hierdurch nicht gewährleistet. Dies hängt sowohl mit Selbstabschattungen des Objekts zusammen, als auch mit Abschattungen, welche durch das triangulierende Erfassungsprinzip entstehen (Abb. 3(c)).



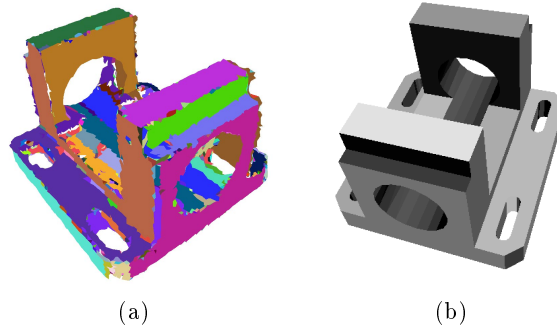
**Abbildung 3.** (a) Aufnahme des gefertigten Teils "Halter 1". (b) Ergebnis der Anfelderung von drei Distanzdatensätzen (hellgrau, dunkelgrau, schwarz). (c) Tiefenbild einer Einzelmessung des Streifenprojektors. Links im Bild ist deutlich das Fehlen von Messungen aufgrund von Abschattungen zu erkennen.

## 4 Segmentierung

Die Segmentierung unterteilt die trianguliert vorliegende Objektoberfläche in ihre Bestandteile (Regionen). Dabei kann nach verschiedenen Kriterien vorgegangen werden. Bei der *regionenorientierten* Segmentierung werden von einer Saat- oder Kernregion ausgehend so lange Punkte in der Nachbarschaft hinzugefügt, wie ein vorgegebenes Homogenitätskriterium erfüllt ist. Als Homogenitätskriterium kommen verschiedene Flächenfunktionen in Betracht. Es können explizite Flächen  $F : z = f(x, y)$  verwendet werden, zum Beispiel Polynome zweiten Grades  $P : z = a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4$ . Die Parameter  $a_i$  der Funktion werden in einer kleinsten Quadrate Approximation bestimmt mit Minimierungskriterium  $\sum_{i=1}^n (z_i - f(x_i, y_i))^2 \stackrel{!}{=} \min$ . Auch implizite Flächenfunktionen  $F : f(x, y, z) = 0$  können als Homogenitätskriterium eingesetzt werden, zum Beispiel Quadriken  $Q : a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x + a_8y + a_9z + a_{10} = 0$ . Diese Flächen können besonders gut mit einer allgemeinen Hauptachsentransformation bestimmt werden, da hier die triviale Lösung  $a_i = 0, i = 1, \dots, n$  umgangen wird. Für eine implizit definierte Ebene entspricht dies der Minimierung von  $\sum_{i=1}^n (a_1x_i + a_2y_i + a_3z_i + a_4)^2$ .

In unseren Untersuchungen wurde die Segmentierung einer dreidimensionalen, triangulierten Oberfläche in *ebene* Regionen mittels Regionenwachstum durchgeführt. Als Homogenitätskriterium dient sowohl der Normalenvektor jedes Dreiecks als auch der Abstand der Eckpunkte von der geschätzten Ebene. Das Ergebnis für den Datensatz "Halter 1" zeigt Abb. 4(a). Die 34,000 Dreiecke des registrierten Gesamtmodells wurden in 598 Regionen segmentiert.

Das 3D CAD-System Pro/ENGINEER ist in der Lage, Oberflächen trianguliert und gruppiert auszugeben. Dadurch erhält man einen der Szenensegmen-



**Abbildung 4.** Segmentierung der Szene (a) und des CAD-Datensatzes (b).

tierung entsprechenden Datensatz. Für das Modell “Halter 1” besteht dieser aus 42 Regionen (Abb.4(b)).

## 5 Attributsberechnung

Die Segmentierung liefert außer der Menge von Dreiecken in jeder Region noch die Parameter der jeweils bestimmten Flächenfunktion. Diese Parameter sind jedoch nicht direkt für eine Objekterkennung verwendbar, da sie nicht invariant gegenüber räumlichen Transformationen sind. Es müssen daher rotations- und translationsinvariante Attribute gefunden und bestimmt werden [5]. In unserem Fall berechnen wir: 3D Umrißpolygon, 3D Zentrum des kanonischen umschließenden Rechtecks, Transformation in lokale (2D) Koordinaten, 2D Umrißpolygon, 2D kanonisches umschließendes Rechteck, Fläche, Umfang, maximale Distanz innerhalb der Region, Breite und Höhe des umschließenden Rechtecks. Dabei haben sich bei unseren Untersuchungen besonders die Höhe und Breite des kanonischen umschließenden Rechtecks sowie die maximale Distanz innerhalb einer Region bewährt. Aufgrund von fragmentierten Rändern und Löchern in Meßdaten und Segmentierung sind Umfang und Flächeninhalt weniger geeignete Merkmale. Als Attribute für die Beziehung zwischen zwei Regionen (relationale Attribute) werden der Winkel zwischen den Normalenvektoren und der Abstand der Flächenzentren errechnet.

## 6 Objekterkennung

Allgemein ist es Aufgabe der Objekterkennung, einer Menge von Merkmalen in der Szene  $S = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  entsprechende Modellmerkmale  $M = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$  zuzuordnen, wodurch eine Menge von Paaren  $\{(F_1, f_{n_1}), (F_2, f_{n_2}), \dots, (F_m, f_{n_m})\}$  entsteht. Theoretisch gibt es  $O(m^n)$  verschiedene Möglichkeiten, solche Paarungen zu bilden. In unserem Kontext entspricht jede Region (Fläche) einem Merkmal und umgekehrt. Natürlich stellt nur ein Bruchteil der Kombinationen gültige Lösungen dar. Verschiedene Verfahren existieren, um die kombinatorische Explosion zu beherrschen, etwa die *Hough Transformation*, *Maximale*

Modell/Szene	33 / 9	28 / 6	26 / 0	5 / 7	12 / 10
max. Distanz	66 / 96	78 / 82	64 / 66	74 / 76	50 / 53
Rechteck Breite	56 / 76	40 / 75	43 / 43	15 / 16	39 / 35
Rechteck Höhe	57 / 71	74 / 41	61 / 60	74 / 75	35 / 40
Flächeninhalt	2125 / 4874	1196 / 1525	1151 / 1417	617 / 937	609 / 940
Umfang	269 / 278	343 / 300	243 / 205	347 / 174	276 / 197

**Tabelle1.** Numerische Werte für die Attribute zugehöriger Regionen. Distanz, Breite und Höhe stimmen gut überein, Flächeninhalt und Umfang sind in Modell und Szene dagegen deutlich verschieden.

*Cliquen, Graph Matching, Diskrete Relaxation und die Baumsuche mit Bedingungen.*

Um die Korrektheit einer Zuordnung zu überprüfen, kann man lokale geometrische Kriterien heranziehen. Dabei kann man zwischen unären und binären Bedingungen unterscheiden. Unäre Bedingungen müssen erfüllt sein zwischen einem Merkmal aus der Szene und dem korrespondierenden Merkmal aus dem Modell. Binäre Bedingungen überprüfen, ob eine Paarung aus Szene- und Modellmerkmal konsistent ist mit allen anderen Paarungen, die aufgestellt wurden [6]. Die globale Korrektheit schließlich kann bewertet werden, indem aus allen zugeordneten Merkmalen eine räumliche Transformation berechnet wird.

In unserer Arbeit verwenden wir das Verfahren der Baumsuche mit Bedingungen. Jedes Merkmal  $F_i$  des Modells besitzt eine Menge  $\Omega(F_i) = \{f_{i,1}, \dots, f_{i,n_i}\}$  möglicher Zuordnungen in der Szene, welche die unären Bedingungen zu  $F_i$  erfüllen. Durch diese Einschränkung ist der Suchraum bereits deutlich kleiner als  $O(m^n)$ . Er wird weiter verkleinert durch die Überprüfung binärer Bedingungen der aktuellen Zuordnung mit allen bisher gefundenen Zuordnungen. Ist eine Bedingung nicht erfüllt, kann der ganze folgende Teilbaum abgeschnitten werden. Da das reale Objekt vom idealen Modell abweichen und die Segmentierung Fehler enthalten kann, muß die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, daß ein Merkmal keine Entsprechung besitzt. Dies wird berücksichtigt durch die leere Zuweisung ( $\lambda$ ).

Abb. 5 zeigt einen Ausschnitt aus dem entstehenden Suchbaum für das Teil "Halter 1", in Abb. 6 sind die korrespondierenden Regionen aus Szene und Modell gegenübergestellt, welche im Suchbaum (Abb. 5) durch große Schrift hervorgehoben sind. Jedes Blatt des Suchbaums stellt eine lokal konsistente Lösung dar. Zur Überprüfung dieser Lösung wurde aus den Mittelpunkten der kanonischen Rechtecke zugeordneter Regionen eine globale Transformation des Modells in die Szene berechnet. Die Abweichung der Mittelpunkte kanonischer Rechtecke (RMS-1) bzw. aller Punkte (RMS-2) kann als Maß für die Übereinstimmung der Szene mit dem Modell verwendet werden (Tabelle 2). In Abb. 7 sind die von der Objekterkennung gefundenen Transformationen durch Überlagerung von Szene und transformiertem Modell im dreidimensionalen Raum veranschaulicht.

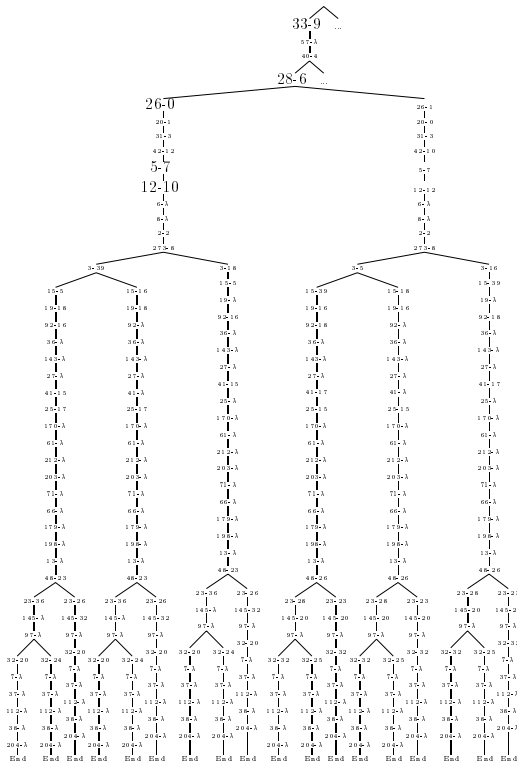


Abbildung5. Ausschnitt aus dem Suchbaum für das Teil "Halter 1".

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

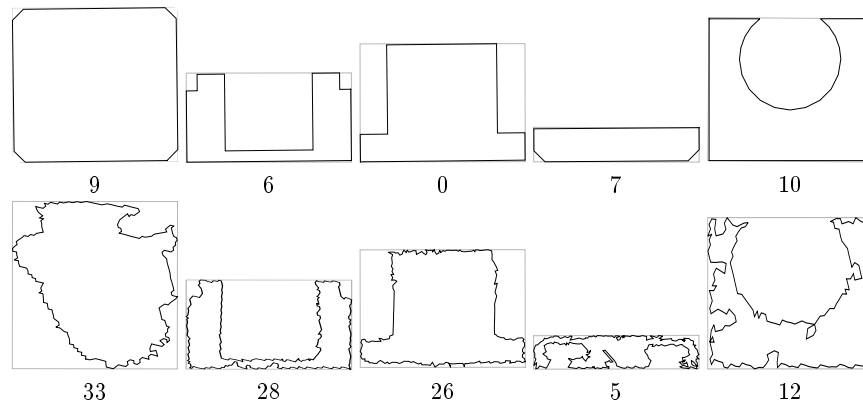
In diesem Beitrag haben wir anhand eines konstruierten Teils die Gesamtkette einer Objekterkennung auf Basis einer 3D-CAD-Objektmodellierung gezeigt. Die nächsten Arbeiten werden sich mit der Erweiterung des Ansatzes auf komplexere Objekte beschäftigen.

### Literatur

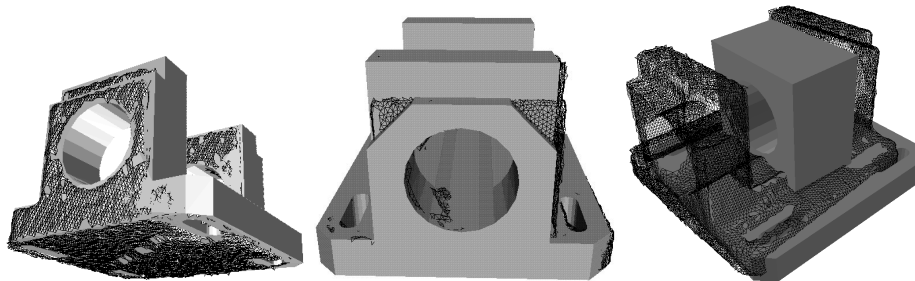
1. ABW. *ABW 640 Bedienungsanleitung*. ABW, Gutenbergstraße 9, 72636 Fricken-

Zuordnung	RMS-1	RMS-2
Szene-Halter 1	1.112	1.323
Szene-Halter 2	1.112	1.396
Szene-Halter 3	5.139	100.466

Tabelle2. RMS-Werte für gefundene Zuordnungen. RMS-1 bezieht sich nur auf zugeordnete Regionen, RMS-2 auf die Abweichungen aller Punkte der triangulierten Szene zum Modell.



**Abbildung 6.** Beispiele zugeordneter Regionen. Oben jeweils die Region aus dem CAD-Modell, unten die aus der Szene segmentierte Region.



**Abbildung 7.** Überlagerung von Szene und in die Szene transformiertem Modell für die Objekte "Halter 1", "Halter 2" und "Halter 3".

- hausen, 1997.
2. M.D. Altschuler, B. R. Altschuler, and J. Taboada. Measuring surfaces spacecoded by a laser-projected dot matrix. In *SPIE vol. 182, Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Assembly*, 1979.
  3. R. Bergevin, M. Soucy, H. Gagnon, and D. Laurendeau. Towards a general multi-view registration technique. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(5):540–547, 1996.
  4. C. Brenner, J. Böhm, and J. Gühring. Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector. In Sabry F. El-Hakim, editor, *Videometrics 6*. International Society for Optical Engineering, 1999.
  5. T.-J. Fan. *Describing and recognizing 3-D objects using surface properties*. Springer series in perception engineering. Springer Verlag, 1990.
  6. W. E. L. Grimson. *Object Recognition by Computer: The Role of Geometric Constraints*. Series in Artificial Intelligence. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
  7. Marc Soucy. Innovmetric's multiresolution modeling algorithms. In *SIGGRAPH'97 Course Notes, Multiresolution Surface Modeling*, 1997.
  8. T. G. Stahs and F. M. Wahl. Fast and robust range data acquisition in a low-cost environment. In *Close-Range Photogrammetry meets Machine Vision, SPIE Vol. 1395*, pages 496–503, 1990.