

Interpretation terrestrischer Scandaten*

Claus Brenner

Zusammenfassung

Im Bereich der terrestrischen Erfassung von Objekten haben sich in den vergangenen Jahrzehnten große Veränderungen ergeben. Durch automatisierte Messverfahren, wie das Laserscanning, können dreidimensionale Messungen so schnell wie nie zuvor erfolgen. Dadurch tritt die Planung einzelner Messpunkte in den Hintergrund. Zugleich begünstigt die Fülle an Daten eine Unterstützung der Auswertung durch automatisierte Interpretationsverfahren.

In diesem Beitrag werden verschiedene Ansätze zur low-, intermediate- und high-level Interpretation von Scandaten aufgezeigt. Insbesondere bei der high-level Interpretation wird auf aktuelle Fragen, wie der Definition von Bedingungs-gleichungen, der Generalisierung sowie der Interpretation mittels grammatikbasierter Modelle eingegangen. Der Ausblick zeigt, dass sich der Trend zu immer umfangreicheren Datensammlungen fortsetzen wird, dass es zugleich jedoch auch Anwendungen gibt, welche ohne die herkömmliche Modellierung in Form von CAD-Modellen auskommen.

Summary

During the last decades, terrestrial data capture has undergone considerable changes. Using automated measurement procedures, such as laser scanning, three-dimensional measurements can be obtained faster than ever before. Therefore, planning of single measurement points has become less important. At the same time, the abundance of data calls for automated interpretation procedures.

This contribution identifies several approaches for low-, intermediate-, and high-level interpretation of scan data. Especially in the case of high-level interpretation, current topics are mentioned, such as the definition of constraint equations, generalization, as well as the interpretation using grammar-based models. As shown in the outlook, the trend towards more extensive data collection will persist; however, there are also applications which do not require traditional modeling in terms of CAD models.

1 Einleitung

Die Interpretation von Messdaten gehört seit je her zu den Aufgaben des Vermessers. Doch hat sich diese Aufgabe über die letzten Jahrzehnte hinweg verändert. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Messverfahren stand früher ausschließlich eine Methodik zur Erfassung von Objekten zur Verfügung, die man als *a priori-Interpretation* bezeichnen kann. Dabei wird das Objekt zunächst visuell erfasst und interpretiert. Anschließend wird dieses Wissen – zusammen mit der Definition der Messaufgabe – verwendet, um gezielt Aufnahmestandpunkte und zu erfassende Objektpunkte zu planen. Durch die Interpretation im Vorfeld ist dabei sichergestellt, dass sich das gesamte Objekt anschließend mittels weniger gemessener Punkte ausreichend gut beschreiben lässt. Grundüberlegung dieser Vorgehensweise ist, dass die gezielte Messung einzelner Punkte einen relativ teuren Vorgang darstellt.

Durch die Photogrammetrie erfolgte eine Entkopplung der Erfassung und Messung. Jedoch blieb zunächst die grundsätzliche Vorgehensweise der Messung ausgewählter Punkte erhalten, wenn auch der Messvorgang selbst vom Feld ins Büro verlagert wurde. Durch die in den 80er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts eingeführten Bildzuordnungsverfahren zeichnete sich jedoch ein Wandel ab. Erstmals wurden Massenzpunkte automatisch gemessen, wobei ihre Auswahl nicht aufgrund einer Interpretation durch den Menschen erfolgte, sondern beispielsweise entlang eines regelmäßigen Gitters oder anhand eines Interestoperators, welcher Punkte auf Basis der lokalen Grauwertverteilung und nicht anhand ihrer Bedeutung im Objektraum selektiert. Die Hauptanwendung dieser Verfahren war und ist die Ableitung von digitalen Geländemodellen. Der Mangel an Interpretation lässt sich dabei häufig durch (sparsames) manuelles Einfügen von Zusatzinformationen, etwa über die Lage von Bruchkanten, ausgleichen.

Mit der Anwendung von dichten Bildzuordnungsverfahren in bebautem Gebiet ändert sich diese Situation. Die hoch strukturierten, anthropogenen Umgebungen erfordern eine stärkere Interpretation der Daten, um sinnvolle Ergebnisse zu erzeugen, ein Trend, der sich über das luftgestützte Laserscanning bis hin zum terrestrischen Laserscanning verstärkt.

Dadurch hat sich die Situation inzwischen umgekehrt: die heutigen luftgestützten und terrestrischen Scanner erreichen Messraten von mehr als 100.000 Punkten pro Sekunde, die Messung des Einzelpunkts ist daher sehr kostengünstig. Der Aufwand für die Vorabplanung der Messpunkte entfällt. Aus der *a priori-* wird die *a posteriori-Interpretation*, welche erst nach der kompletten Messung erfolgt. Aufgrund der enormen Datenmenge

* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrags beim 74. DVW-Seminar »Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007)« am 5. und 6. Dezember 2007 in Fulda. Die Beiträge zum Seminar sind als Band 53 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden. Weitere Informationen siehe Rückseite innen in dieser zfv.

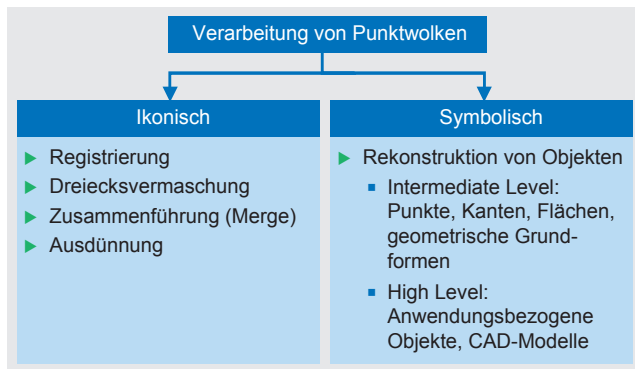


Abb. 1: Ikonische und symbolische Verarbeitung von Punktwolken.

und der ungezielt erfolgten Messungen steigt jedoch der Aufwand für die Interpretation am Ende der Auswertekette. Deshalb ist es wichtig, durch automatisierte Interpretationsverfahren die enorme Messdichte auszunutzen, um den Bedarf an manueller Interaktion zu minimieren und Auswerteverfahren dadurch insgesamt kostengünstig anbieten zu können.

Die beiden prinzipiell möglichen Vorgehensweisen bei der Erfassung von Objekten aus dichten Punktwolken sind in Abb. 1 aufgezeigt. Bei der ikonischen Verarbeitung kommt man i. a. ohne Interpretation aus. Ziel ist dabei die Erzeugung eines (meist) dreiecksvermaschten Oberflächenmodells. Abb. 2 zeigt die Vorgehensweise exemplarisch anhand der Erfassung einer Statue. Obwohl auch die ikonische Erfassung durchaus mit großem manuellen Aufwand verbunden sein kann, besonders was

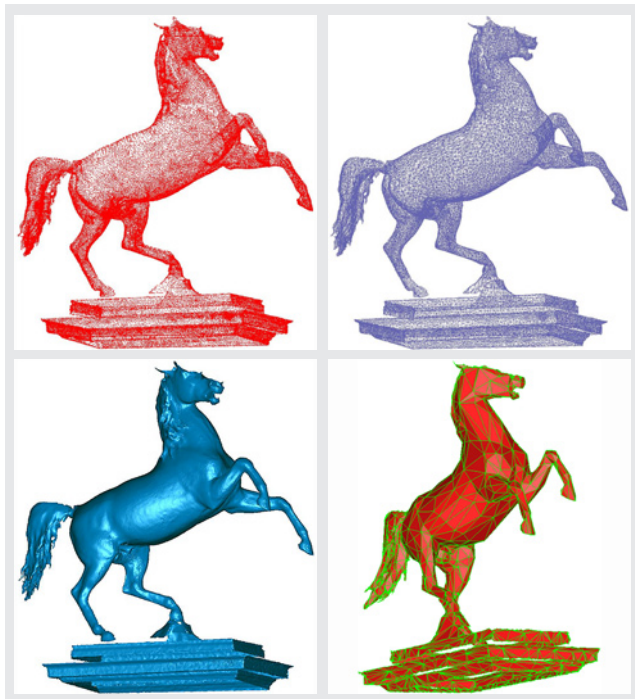


Abb. 2: Ikonische Erfassung am Beispiel einer Statue (Sachsenross vor dem Hauptgebäude der Leibniz Universität Hannover). Von links nach rechts und oben nach unten: Registrierte Punktwolke, Dreiecksvermaschung, Oberflächenmodell, Ausdünnung der Dreiecksvermaschung.

die Herstellung einer geschlossenen und topologisch korrekten Oberflächentriangulierung anbelangt, ist sie doch prinzipiell hoch automatisiert durchführbar und in kommerziellen Produkten verfügbar.

Die symbolische Auswertung hat dagegen die Interpretation der Punktwolke im Sinn, was in praktischen Anwendungen heute meist in der Erstellung eines CAD-Modells resultiert. Abb. 3 zeigt die Vorgehensweise in einer heute typischen Softwareumgebung. Auffällig ist dabei der hohe manuelle Aufwand.

So wird der Umring des Kirchturms manuell digitalisiert und anschließend zum (Quader-)Volumen extrudiert. Sowohl die Lage des Umrings als auch die Grenzen der Extrusion werden dabei vom Operator visuell anhand der zugleich angezeigten Punktwolke festgelegt. Aus messtechnischer Sicht ist diese (durchaus übliche) Vorgehensweise insofern bedenklich, als dass die Einpassung visuell und nicht rechnerisch, z. B. durch kleinste-Quadrate Schätzung der Quaderposition und -ausdehnung anhand der Messpunkte, erfolgt.

Andere Softwarelösungen erlauben eine teilautomatisierte Interpretation, beispielsweise das Markieren einer kleinen Zahl von Messpunkten, welche dann anschließend automatisch zur größtmöglichen zusammenhängenden ebenen Fläche expandiert werden. Der Vorgang führt nicht nur zur Gruppierung der Messpunkte, sondern auch zur Berechnung einer ausgleichenden Ebene. Dies ist gegenüber dem vorigen diskutierten Ansatz aus messtechnischer Sicht besser, führt jedoch an anderer Stelle zu Problemen. Da die Rekonstruktion eines Körpers (wie in Abb. 3) nun nicht mehr über die Instantiierung eines volumetrischen CAD-Modells, sondern »bottom-up« über die einzeln rekonstruierten Flächen erfolgt, sind zunächst weder eine geschlossene Oberfläche noch typische Regularisierungsbedingungen (rechte Winkel, vier Ebenen treffen sich in einem Punkt) gewahrt. Sie werden typischerweise durch manuelle Nacharbeit der Flächen Grenzen sowie durch »snapping«-Operationen nachträglich eingeführt. Hierauf wird in Abschnitt 4.1 noch eingegangen.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass ein Mangel an automatischer Interpretation besteht und der Bedarf hierfür in der Zukunft eher zunehmen wird. Dabei sind heute Punktwolken mit einigen Millionen bis einigen hundert Millionen Punkten Standard für die Erfassung einzelner Objekte. In Zukunft werden scannerbasierte Erfassungssysteme auf Fahrzeugen (Talaya et al. 2004, Kukko et al. 2007) die terrestrische Erfassung ganzer Städte erlauben. Zusätzlich ermöglichen zunehmend auch videobasierte Systeme die Ableitung dichter terrestrischer Punktwolken (Nistér 2001). Dabei entfällt zunehmend nicht nur die Planung der einzelnen zu messenden Punkte, sondern auch der Aufnahmestandpunkte selbst – sie ergeben sich durch eine Kamera- oder Scannertrajektorie, welche sich häufig durch externe Beschränkungen ergibt.

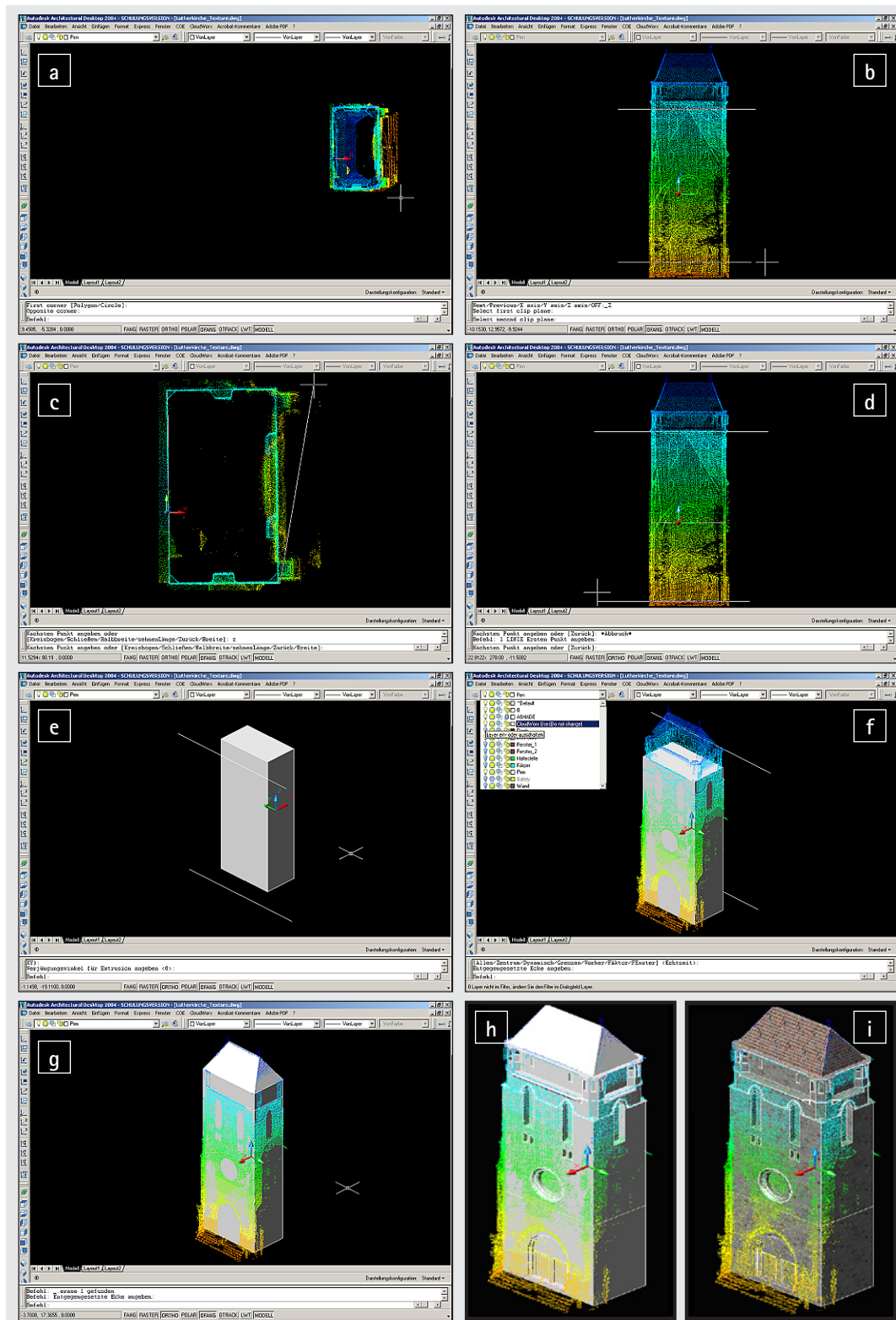


Abb. 3: Modellierung eines Kirchturms (Lutherkirche, Hannover) mittels der Software AutoCAD/CloudWorx. Von links nach rechts und oben nach unten: (a) Auswahl von Messpunkten in der Aufsicht, (b) Auswahl in der Seitenansicht, (c) Digitalisierung des Umrings, (d) Festlegung der Grenzen für die Extrusion, (e) erzeugter Quader, (f) Vergleich mit Punktwolke, (g) Modellierung des Dachs, (h) endgültiges Ergebnis ohne Textur und (i) mit Textur.

2 Ansätze für die Interpretation ikonischer Daten

Prinzipiell lassen sich zwei grundsätzliche Vorgehensweisen bei der Interpretation von Scandaten, oder allgemein bei der Interpretation ikonischer Daten, unterscheiden: »bottom-up« oder »top-down«, bzw. »datengetrieben« oder »modellgetrieben«. Typischerweise treten sie in praktischen Realisierungen in Mischformen auf.

Der datengetriebene Ansatz versucht dabei, ausgehend von den Daten, d. h. den einzelnen Messpunkten, schrittweise komplexere Strukturen aufzubauen, wobei nur relativ generische Annahmen getroffen werden. Beispielsweise können herausragende Punkte, Kanten, ebene oder gekrümmte Flächen extrahiert oder Elemente aufgrund von Inzidenz, Rechtwinkligkeit oder Parallelität gruppiert werden.

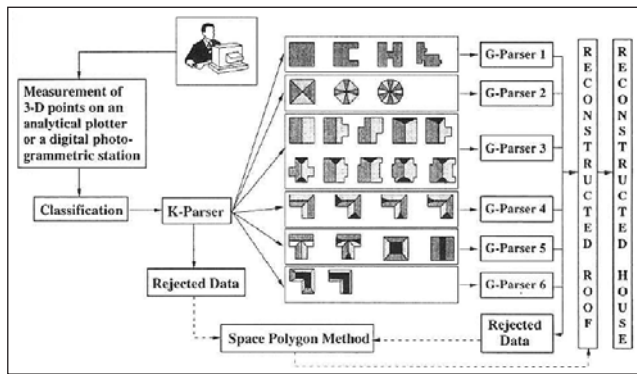


Abb. 4: Beispiel für einen modellgetriebenen Ansatz zur Rekonstruktion von Gebäuden. In der Mitte ist die umfangreiche Modellbibliothek zu sehen. Entnommen aus A. Grün (1997).

Umgekehrt geht man beim modellgetriebenen Ansatz von spezifischen Annahmen aus, beispielsweise einem parametrisierten CAD-Modell des zu vermessenden Objekts. Die Aufgabe ist dann, die Lage des Objekts in der Szene zu finden sowie dessen Parameter zu berechnen.

An dieser Stelle sei ein Blick auf die Rekonstruktion von Objekten aus luftgestützt gewonnenen Sensordaten gestattet, welche sich bereits seit mehr als 20 Jahren mit der Automatisierung der Rekonstruktion hoch strukturierter Objekte beschäftigt – mit 3D-Stadtmodellen. Ein Beispiel für einen datengetriebenen Ansatz findet sich bei Fischer et al. (1998). Dabei werden zunächst Punkte, Linien und Flächen extrahiert, diese dann zu Ecken gruppiert, welche wiederum Basisbausteine für höherwertige Gebäudeteile, genannt *Konnektoren* und *Terminale*, bilden. Ein modellgetriebener Ansatz wird dagegen von Grün (1997) beschrieben, wobei eine umfangreiche Sammlung von Gebäudemodellen als Grundlage dient

(Abb. 4). Doch selbst für die augenscheinlich eingeschränkte Klasse möglicher Dachformen zeigte sich die Unmöglichkeit einer expliziten Auflistung aller Modelle. Andere Forschungsarbeiten gingen deshalb in Richtung einer Gesamtmodellierung auf der Basis einfacher Grundprimitive, anhand von Luftbildern (Förstner 1999) oder Laserscans (Brenner 1999, s. a. Abb. 5). Diese *constructive solid geometry (CSG)* Modellierung stellt gewissermaßen eine Kombination von daten- und modellgetriebener Rekonstruktion dar, da die Grundprimitive einerseits spezifisch (verglichen mit Punkten, Linien, Flächen), andererseits generisch (verglichen mit Gesamtmodellen von Gebäuden, sowie aufgrund ihrer Parametrierung) sind. Eine Zusammenfassung der Situation im luftgestützten Fall findet sich in (Brenner 2005).

Auch im Nahbereich findet diese Kombination aus daten- und modellgetriebenem Vorgehen häufig Anwendung. Im Folgenden wird zunächst auf die Extraktion von Merkmalen aus Daten eingegangen (Abschnitt 3), dann auf ihre Kombination zu höherwertigen Objekten (Abschnitt 4).

3 Low- und Intermediate-Level Interpretation

3.1 Punkte

Die Extraktion von (bedeutungsvollen) Punkten ist eine Standardaufgabe der photogrammetrischen Bildinterpretation. Wie bereits dargelegt, erfolgte die Auswahl früher manuell anhand der wichtigen Objektstrukturen, später jedoch vollautomatisch aufgrund der Grauwertverteilung im Bild. Punkte werden dadurch nicht entsprechend ihrer Bedeutung, sondern aufgrund ihrer guten Messbarkeit extrahiert.

In terrestrischen Laserscans werden selten einzelne Objektpunkte zum Zwecke der Modellierung von Objekten extrahiert. Beispielsweise spielt die direkte, automatische Extraktion von »Eckpunkten« zum Zwecke der Erstellung eines Drahtmodells keine Rolle. Eckpunkte ergeben sich dagegen indirekt als Schnittpunkte von flächigen Objekten, welche automatisch aus den Scans extrahiert werden (s.u.).

Punkte werden jedoch sehr häufig für die Registrierung (Orientierung, Anfeinerung) von getrennt gewonnenen terrestrischen Scandaten eingesetzt. Dies ist eine Standardprozedur, welche i. d. R. bei der Gewinnung eines Gesamtdatensatzes aus den Punktwolken der einzelnen terrestrischen Scannerstandpunkte eingesetzt wird. Sie ist in vielen Scan- und Auswertprogrammen verfügbar. Punkte sind für die Registrierung beson-

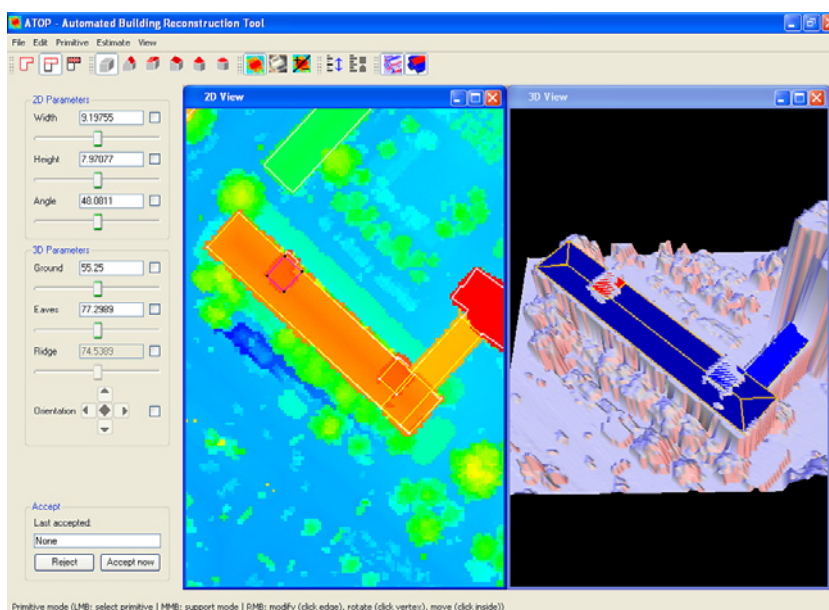


Abb. 5: Beispiel eines kombiniert daten- und modellgetriebenen Rekonstruktionsansatzes (ATOP). Das Objekt wird durch Kombination einzelner Grundprimitive dargestellt. ATOP ist verfügbar unter www.ikg.uni-hannover.de/3d-stadtmodelle.html.

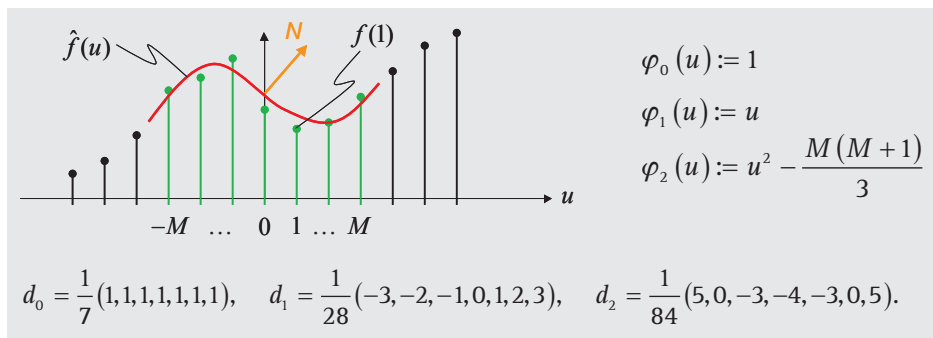


Abb. 6: Bestimmung der Koeffizienten einer quadratischen Funktion mittels orthogonaler Basisfunktionen (Beispiel in einer Dimension). Skizze (links), Basisfunktionen (rechts) und für $M=3$ resultierende Faltungsmasken (unten).

ders geeignet, weil für die Bestimmung der Euklidischen (bzw. der Ähnlichkeits-)Transformation, welche zwei (Scan-)Koordinatensysteme ineinander überführt, mittels Punktkorrespondenzen geschlossene, d. h. nichtiterative, Lösungen bereitstehen (Sansò 1973, Horn 1987).

Meist werden die zu extrahierenden Punkte jedoch signalisiert, etwa durch retroreflektive Marken, welche vor dem eigentlichen Scanvorgang im Objektraum platziert werden müssen. Aufgrund ihrer starken Rückstrahlung lassen sich die Punkte leicht anhand des Intensitätskanals des Scanners durch eine Schwellwertoperation auffinden. Die identifizierten Punkte werden anschließend einem zusätzlichen Feinscan unterzogen, um sie mit hoher Genauigkeit bestimmen zu können (Ullrich et al. 2003).

Zunehmend wird auch die Verwendung unsignaler Punkte untersucht. Kern der Überlegungen ist hierbei, dass signalisierte Punkte zwar eine hohe Messgenauigkeit bieten, andererseits jedoch

- 1) eine Signalisierung nicht immer möglich ist,
- 2) die Zahl der signalisierten Punkte aus praktischen Gründen relativ klein ist, und
- 3) die Verteilung der Punkte im Raum womöglich nicht in optimaler Weise erfolgen kann.

Auch wenn die Messgenauigkeit bei nicht signalisierten Punkten geringer ist, sprechen ihre sehr große Anzahl und ihre günstige Verteilung auf dem zu erfassenden Objekt für ihren Einsatz.

Beinat et al. (2006) extrahieren Punkte, welche eine maximale Oberflächenkrümmung aufweisen. Die Krümmung wird dabei indirekt berechnet aus den Koeffizienten einer lokal an die Punktwolke bestangepassten Fläche 2. Ordnung. Der Rechenaufwand zur Bestimmung der Krümmung wird häufig als sehr hoch angesehen, es ist jedoch zu beachten, dass im Falle einer regelmäßig gerasterten Oberfläche orthogonale Basisfunktionen verwendet werden können, so dass sich die Bestimmung der Koeffizienten (bzw. der ersten und zweiten Ableitungen der Funktion im Nullpunkt) als einfaches Faltungsprodukt durchführen lässt (Besl & Jain 1988, s. a. Abb. 6).

Die Verwendung lokaler Oberflächeneigenschaften hat den Nachteil, dass die daraus resultierende Beschreibung häufig nicht spezifisch genug ist. Beispielsweise haben alle Punkte auf dem Mantel eines Zylinders dieselbe Krümmung, so dass in industriellen Szenen mit vielen Rohrleitungen die Zahl möglicher Punktkorrespondenzen

durch dieses Kriterium nicht ausreichend eingeschränkt wird. Deshalb wurde von verschiedenen Autoren untersucht, inwiefern Intensitätsdaten, welche häufig gleichzeitig erfasst werden, für die Suche nach Korrespondenzen eingesetzt werden können. Roth (1999) extrahiert Interessenspunkte mittels des Susan-Operators aus dem Intensitätskanal eines Scanners und stellt anschließend 3D-Korrespondenzen über die synchron vorliegenden Distanzdaten her. Ähnlich gehen Bendels et al. (2004) vor, nutzen hierbei jedoch den in der Bildverarbeitung sehr erfolgreich eingesetzten *SIFT* (*Scale Invariant Feature Transform*) Operator (Lowe 2004). Die Anwendung auf Punktwolken, welche mittels eines terrestrischen Scanners erfasst wurden, zeigen Böhm & Becker (2007). Dabei wird der Intensitätskanal des Scanners verwendet, es wird jedoch auch die Möglichkeit der Zuordnung des Intensitätskanals zu einer Fotografie gezeigt. Die Zuordnung anhand von getrennt aufgenommenen Fotografien, ebenfalls bereits von Roth (1999) diskutiert, wird für den Fall terrestrischer Scans von Barnea und Filin (2007) durchgeführt. Hierbei werden die zu den extrahierten Bildpunkten gehörenden Objektpunkte anhand der bekannten relativen Orientierung von Laserscanner und aufgesetzter Kamera berechnet.

3.2 Flächen

Da die Scanpunktwolke die Oberfläche von Objekten beschreibt, liegt es nahe, oberflächenbasierte Segmentierungsverfahren einzusetzen. Ziel ist es dabei, die Punktwolke in einzelne Teilflächen aufzuteilen, welche sich wiederum funktional beschreiben lassen. D. h., es soll eine Aufteilung der Punktwolke R in Teilmengen R_i erfolgen, die einem Prädikat (Homogenitätskriterium) $P(\cdot)$ genügen, welches die Zugehörigkeit zu einem funktional gegebenen Oberflächenelement ausdrückt. Formal soll die Aufteilung dabei den folgenden fünf Bedingungen genügen:

$$\bigcup_i R_i = R$$

$$\forall i: R_i \text{ zusammenhängend}$$

$$\forall i \neq j: R_i \cap R_j = \emptyset$$

$$P(R_i) = \text{wahr}$$

$$\forall i \neq j: P(R_i \cup R_j) = \text{falsch für } R_i, R_j \text{ benachbart.}$$

Dieses Problem ist nicht exakt mit vertretbarem Aufwand zu lösen, denn bei gegebenen Scandaten besteht die Aufgabe darin, jedem der n Scanpunkte eine der m Untermengen R_i zuzuordnen (wobei erschwerend m zunächst unbekannt ist), so dass m^n Kombinationen getestet werden müssten. Deshalb arbeitet man mit heuristischen Verfahren, welche die Punktwolke »bottom-up« oder »top-down« zerlegen, beispielsweise Bereichswachstumsverfahren oder split- bzw. split-and-merge Ansätzen. Bei all diesen Verfahren ist jedoch zu bedenken, dass sie i. d. R. nicht zum optimalen, sondern nur zu einem guten Ergebnis führen. Bei Bereichswachstumsverfahren ist das Ergebnis beispielsweise von der Reihenfolge der Selektion der Saatregionen abhängig.

Für die Segmentierung von Scandaten bzw. Distanzbildern in Teilflächen existiert eine sehr große Zahl von Verfahren. Hoover et al. (1996) haben den Versuch unternommen, verschiedene Ansätze experimentell zu vergleichen. Besonders häufig eingesetzt werden:

Bereichswachstumsverfahren (region growing)

Dabei werden zunächst kleine Saatregionen identifiziert, typischerweise anhand ihrer besonders geringen Restklaffung bezüglich einer lokal geschätzten Ebene. Anschließend wird die »beste« Saatregion ausgewählt und es werden benachbarte Scanpunkte hinzugefügt, die das Homogenitätskriterium (z.B. Zugehörigkeit zu derselben Ebene) erfüllen. Lassen sich keine Punkte mehr hinzufügen, wird die Region als neue Region R_i akzeptiert und das Verfahren fährt fort mit der Selektion der »nächstbesten« Saatregion. Aufgrund der einfachen Implementierbarkeit ist das Bereichswachstumsverfahren sehr beliebt. Abb. 7 zeigt die Anwendung des Bereichswachstumsverfahrens zur Segmentierung ebener Flächen auf mehrere terrestrische Laserscans (Dold & Brenner 2004).

Scanline grouping

Dieses von Jiang & Bunke (1992) vorgestellte Verfahren arbeitet ähnlich wie das Bereichswachstumsverfahren, jedoch werden in der Wachstumsphase nicht nur einzelne Scanpunkte, sondern lineare Segmente von Scanpunkten hinzugefügt. Im Test von Hoover et al. (1996) war es nicht nur schneller, sondern auch besser als andere Verfahren. Da das Verfahren die Nachbarschaften innerhalb von und zwischen Scanzeilen ausnutzt, kann es nur dann direkt eingesetzt werden, wenn diese bekannt sind – also typischerweise zur Segmentierung einzelner Scanstandpunkte. Zur Segmentierung einer Punktwolke ohne Nachbarschaftsbeziehungen haben Sithole & Vosselman (2003) zunächst die Punktwolke in schmale Streifen unterteilt, welche dann die Rolle von Scanzeilen übernommen haben.

RANSAC (random sampling consensus)

Dieses von Fischler & Bolles (1981) vorgeschlagene robuste Schätzverfahren lässt sich auch für die Segmentierung einsetzen. Dabei wird im ersten Schritt versucht, die Fläche zu finden, auf welcher die meisten Scanpunkte liegen. Alle anderen Scanpunkte werden dabei als Ausreißer betrachtet. Das Verfahren startet durch zufällige Auswahl der minimal zur Festlegung der Flächenparameter benötigten Anzahl von Punkten (z.B. drei für eine Ebene) und ermittelt anschließend unter Verwendung einer gegebenen maximalen Abweichung die Zahl der übrigen Scanpunkte, welche zu dieser Fläche gehören. Diese Auswahl wird wiederholt (= random sampling) und die Fläche mit der größten Anzahl zugehöriger Punkte (= consensus) wird akzeptiert. Anschließend wird das Verfahren mit den verbleibenden Punkten fortgesetzt.

Hough-Transformation

Dieses von Hough (1962) vorgeschlagene Verfahren arbeitet global. Es beruht darauf, dass jedes parametrisiert darstellbare Objekt durch einen Punkt im Parameterraum beschrieben wird. Der Parameterraum wird in diskrete Zellen aufgeteilt (Akkumulator) und jedes Bildelement (bzw. jeder Scanpunkt) im Ortsraum »stimmt« (*votes*) für eine oder mehrere diskrete Zellen. Die Zelle des Parameterraums, auf welche an-

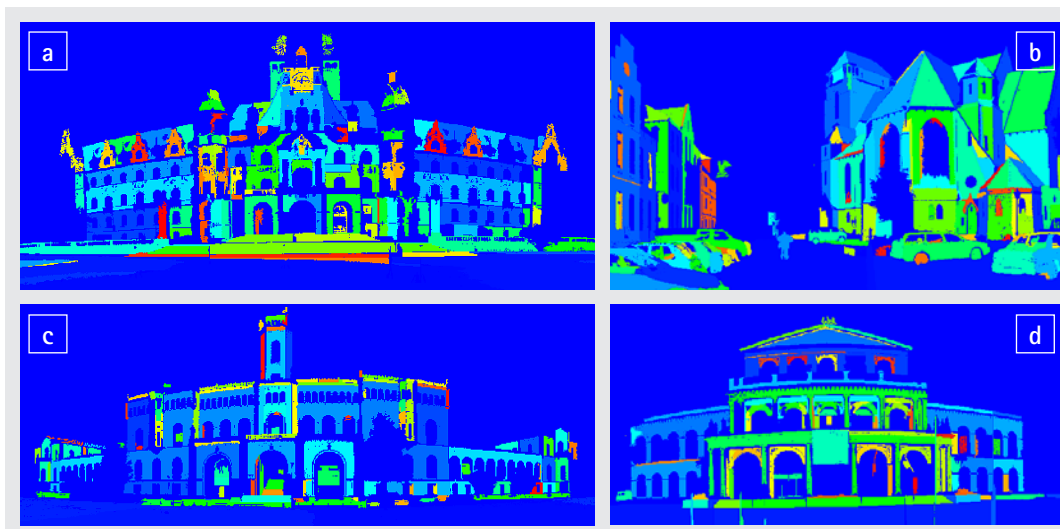


Abb. 7: Beispiel für Ebenensegmentierungen von terrestrischen Laserscans mittels eines Bereichswachstumsverfahrens. Von links nach rechts und oben nach unten: (a) Neues Rathaus Hannover, (b) Lutherkirche, (c) Welfenschloss (Hauptgebäude der Leibniz Universität) und (d) Oper. Jede Farbe steht für eine segmentierte Fläche.

schließlich die meisten Stimmen entfallen, korrespondiert mit dem dominanten Objekt in der Szene. Obwohl von Hough im Kontext der Linienextraktion vorgeschlagen, lässt sich das Verfahren auf alle parametrisch darstellbaren Objekte anwenden. Allerdings führt die Verwendung komplexer Objekte zu einem hochdimensionalen Parameterraum, welcher bezüglich Speicherplatz und Rechenzeit nicht mehr handhabbar ist. Als Ausweg kann manchmal mittels der sequentiellen Hough-Transformation der Parameterraum in mehrere Räume mit jeweils niedrigerer Dimension aufgespalten werden (Rabbani & van den Heuvel 2005).

Die Segmentierung von Flächen *höherer Ordnung* ist meist schwierig, insbesondere wenn die Ordnung im Rahmen der Segmentierung ebenfalls festgestellt werden soll. Besl & Jain (1988) beschreiben die Methode »variable-order surface fitting«, bei der zunächst von einer ebenen Saatregion ausgegangen wird, welche dann schrittweise erweitert wird. Wenn Punkte gefunden werden, welche der Annahme einer Ebene widersprechen, wird entweder eine neue Region begonnen, oder die Ordnung der Fläche wird erhöht, um diese Punkte dennoch in die Fläche integrieren zu können. Allerdings ist die Anwendbarkeit derartiger Verfahren in der Praxis oft begrenzt. Das Kernproblem ist dabei, dass der Algorithmus wählen muss zwischen der Trennung einer Punktmenge in mehrere Flächen niedrigerer Ordnung und der Zusammenfassung aller Punkte mit Darstellung durch eine einzige Fläche höherer Ordnung. Die hierbei offensichtlich zu treffende Abwägung zwischen Modellkomplexität und Restklaffung ist schwer zu formalisieren und zu realisieren, besonders wenn sie in das iterative Schema des Bereichswachstumsverfahrens eingebettet ist.

3.3 Primitive

Auf die Extraktion von primitiven Volumenkörpern im Bereich des luftbasierten Laserscannings wurde bereits eingegangen. Im Bereich der 3D-Stadtmodellierung aus terrestrischen Laserscans ist die Nutzung von Primitiven aufgrund der enormen Fülle von geometrischen Fassadenelementen problematischer. Dagegen sind in industriellen Umgebungen häufig standardisierte Körper anzutreffen, beispielsweise Rohre, Rohrknicke, T-Verbindungen oder auch Stahlträger mit charakteristischen Querschnitten. In solchen Umgebungen kann die automatische Extraktion von generischen Grundkörpern, wie etwa Zylindern, mit Erfolg angewendet werden (Rabbani 2006). Wenn man darüber hinaus bereits die Parameter der in der Szene erwarteten Körper kennt, wie dies etwa bei der automatischen Objekterkennung industrieller Teile der Fall ist, kann man die Vorinformation über die Krümmung bereits während der Segmentierung nutzen (Böhm 2005).

4 High-Level Interpretation

Aus der bisherigen Diskussion wird klar, dass heute die automatische Interpretation von Laserscandaten noch längst nicht mit menschlichen Fähigkeiten konkurrieren kann. Oder, wie es W. Förstner im Kontext der automatischen Stadtmodellierung ausgedrückt hat,

»It can be doubted that automatic systems can achieve success rates comparable to human operators within the next few decades« (Förstner 1999).

Grund hierfür ist, dass die Interpretation von Laserscandaten ein Spezialfall der generellen Aufgabe der Szeneninterpretation ist, welche weitreichende Kenntnisse und kognitive Fähigkeiten voraussetzt. Man muss sich auch darüber im Klaren sein, dass ein und dieselbe Oberfläche eines Objekts das Resultat (unendlich vieler) unterschiedlicher konstruktiver Vorgehensweisen sein kann. Da ein CAD-Modell meist die konstruktive Vorgehensweise beinhaltet, ist ersichtlich, dass aus einer gegebenen Oberfläche ohne zusätzliche Information nicht eindeutig ein CAD-Modell abgeleitet werden kann.

4.1 Beziehungen zwischen Objektteilen bzw. Objekten

Bis auf weiteres kann also die automatische Interpretation nur im Umfang einer Unterstützung eines menschlichen Operateurs eingesetzt werden. Bislang geschieht dies vorwiegend durch kleinere Werkzeuge, etwa die bereits erwähnte manuelle Selektion von Punkten einer Ebene mit anschließender automatischer Expansion. Hierbei wird also dem Operateur die Interpretation überlassen, das System unterstützt lediglich bei der anschließenden Selektion der zur Fläche gehörenden Punkte. Das von Rabbani (2006) beschriebene System reicht hier weiter und segmentiert alle in der Szene enthaltenen Zylinder (Rohre) automatisch.

In beiden Fällen stellt jedoch die Verbindung der identifizierten Objektteile (Ebenen, Zylinder) zu größeren Einheiten (Quader, Rohrleitungen) ein Problem dar, welches die grundsätzlichen Schwierigkeiten heutiger Werkzeuge aufzeigt. Programme zur Modellierung aus Laserscandaten unterstützen die Extraktion von Objektteilen, wie etwa die Parameterschätzung von Ebenen, es mangelt jedoch an effizienten Werkzeugen zur Kombination der Teile zu einem CAD-Gesamtmodell. Umgekehrt besitzen CAD-Programme diese Fähigkeiten, es mangelt jedoch dort an Werkzeugen zur Anpassung an die Punktwolke; dies geschieht üblicherweise in der in Abb. 3 gezeigten Weise allein durch visuelle Beurteilung.

Die Erfassung von Objektstrukturen, welche zusätzlichen Bedingungen genügen, ist daher heute nicht befriedigend gelöst. Beispielsweise sind bei der Extraktion von parallelen Säulen oder Rohren mittels bestangepasster

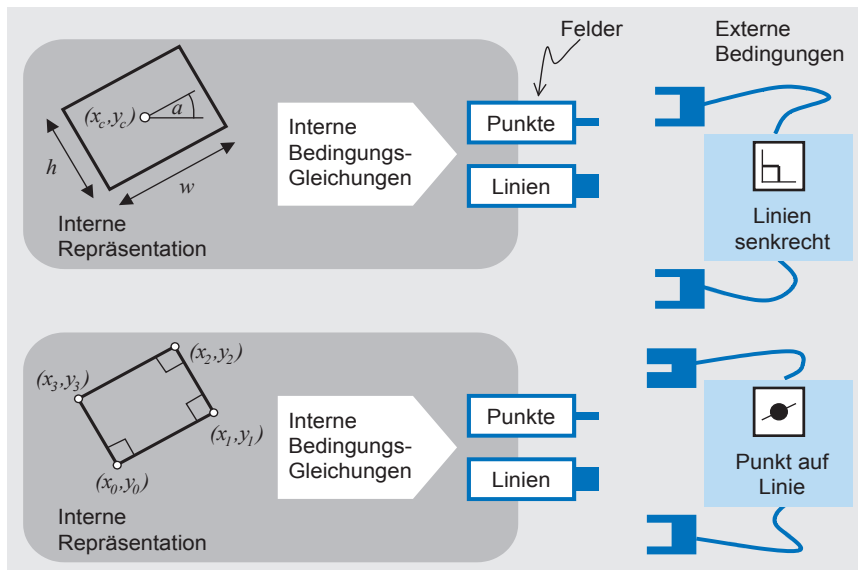


Abb. 8: Konzept weicher Primitive am Beispiel von Rechtecken. Links oben die Repräsentation mit minimaler Parameterzahl (fünf). Links unten eine Repräsentation mit acht Parametern und drei impliziten Bedingungsgleichungen (rechte Winkel). Für den Nutzer erscheinen beide Repräsentationen identisch, sie sind nach außen hin gekennzeichnet durch die Felder »Punkte« und »Linien« (jeweils vier Felder). An diese externen Felder lassen sich zusätzliche Bedingungen »andocken«, wobei nur semantisch korrekte Verbindungen zulässig sind.

Zylinder die resultierenden Zylinderachsen aufgrund von Messfehlern nicht exakt parallel. Durch Konstruktion oder auch durch anschließendes »snapping« kann dieser Zustand zwar hergestellt werden, dadurch wird jedoch die Eigenschaft der Bestanpassung zerstört. An dieser Stelle wird also eigentlich aus Sicht der Rekonstruktion ein Verfahren benötigt, welches die optimale Anfelderung *unter der Bedingung* paralleler Achsen berechnet. Ähnliche Probleme treten in sehr vielen weiteren Situationen auf, z.B. bei der Verbindung von Rohrleitungen, beim Schnitt von Dach- und Fassadenflächen oder bei mehrfach in der Szene vorhandenen, identischen Objekten.

Was fehlt, ist ein Werkzeug, welches die erforderlichen Regularitätsbedingungen nicht – wie bei CAD-Programmen üblich – konstruktiv herstellt, sondern vielmehr als Bedingungsgleichungen aufstellt und anschließend im Rahmen einer Gesamtausgleichung berücksichtigt. Dabei stellt sich die Frage, wie Bedingungsgleichungen in strukturierter Weise erstellt und verwaltet werden können, und wie die Introspektion umfangreicher Gleichungssysteme erfolgen kann (Brenner 2005). Für die strukturierte Einführung von Bedingungsgleichungen wurden vom Autor sog. »weiche Primitive« vorgeschlagen, welche die Oberflächengeometrie mit zugehörigen Bedingungsgleichungen als funktionale Einheiten (Primitive) bündelt (Brenner 2004, s. a. Abb. 8). Dadurch stehen sie einerseits als high-level Objekte der Modellierung zur Verfügung, vergleichbar CSG-Primitiven, andererseits können bei Bedarf die Bedingungsgleichungen verändert werden. »Harte« Bedingungen wie Parallelität und Rechtwinkligkeit können so, wenn nötig, »aufgeweicht« werden, um eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten zu erreichen.

4.2 Generalisierung

Während in manchen Anwendungen die Interpretation der Scandaten zu einem einzigen, »bestdetaillierten« Modell führen soll, etwa bei der Erfassung von Industrie-

anlagen, ist es in anderen Anwendungsgebieten erforderlich, Modelle in verschiedenen Detaillierungsgraden (Level-of-Detail, LoD) bereitzustellen.

Beispielsweise definieren Kolbe & Gröger (2006) fünf verschiedene LoD für dreidimensionale Stadtmodelle. Verschiedene LoD sind im Hinblick auf verschiedene Nutzer und Anwendungen sinnvoll, aber auch, um umfangreiche Modelle interaktiv darstellen und handhaben zu können. Idealerweise ist das Ziel einer Objektmodellierung aus Laserscandaten, die Grundlage für *alle* LoD des betreffenden Objekts zu schaffen. Dadurch vermeidet man teure Mehrfacherfassungen. Allerdings hat es sich als äußerst schwierig herausgestellt, größere LoD aus geometrischen Repräsentationen feinerer LoD automatisch abzuleiten (Thiemann 2003, Kada 2006). Eine Lösung hierfür ist, dass bereits während der Erfassung zusätzliche semantische Information integriert wird, welche die spätere Generalisierung ermöglicht. Im einfachsten Fall kann die Modellierung von Objekten von grob nach fein erfolgen, wobei die Modellierungsreihenfolge Bestandteil der Objektbeschreibung wird. Dadurch lassen sich mit geringem Aufwand verschiedene LoD erzeugen. In zwei Dimensionen wurde ein ähnliches Verfahren, welches jedoch auf einer automatischen Generalisierung von Polygonen beruht, von Sester & Brenner (2004) beschrieben.

4.3 Prozedurale und grammatikbasierte Modelle

Im Bereich der Computergrafik werden seit einigen Jahren prozedurale Modelle zur Generierung von 3D-Stadtmodellen untersucht (Wonka et al. 2003, Parish et al. 2001). Hintergrund ist hier der Wunsch, große Stadtlandschaften automatisch zu generieren, um sie beispielsweise in Filmen oder Spielen einsetzen zu können. Dazu werden Regeln erstellt, welche die Generierung von Gebäuden bzw. von Fassadenstrukturen beschreiben. Das Regelwerk entspricht damit einer formalen Grammatik, ein einzelnes Objekt, beispielsweise eine ausgestaltete Fassade,

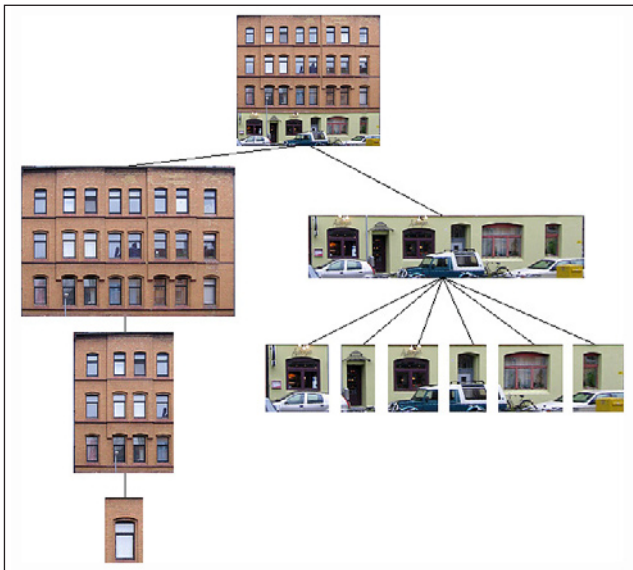


Abb. 9: Beispiel der Repräsentation einer Fassade durch einen Ableitungsbaum. Zunächst wird die Fassade in einen oberen und unteren Teil getrennt. Der obere Teil wird anschließend in zwei symmetrische Fassadenteile getrennt, diese enthalten wiederum ein regelmäßig angeordnetes Raster von einzelnen Fenstern.

entspricht einem (mit Hilfe der Grammatik erstellten) Ableitungsbaum. Außer den Regeln, welche wichtige strukturelle Eigenschaften festlegen, enthält der Mechanismus noch einen stochastischen Anteil, welcher die Auswahl unterschiedlicher Regeln zufällig steuert. Dadurch können mit ein und derselben Grammatik sehr viele unterschiedliche Objekte automatisch erzeugt werden.

Im Bereich der Interpretation von Daten hat diese Vorgehensweise auch ihre Berechtigung, denn durch die strukturelle (Grammatik) und stochastische (Wahrscheinlichkeiten bzw. Dichten) Modellierung liegt eine explizite Modellrepräsentation vor. Beispielsweise steuert die Grammatik, dass eine Fassade Fenster enthalten kann, während eine gegebene Dichte die zulässigen Fenstergrößen modelliert. Das Modell schränkt also effektiv die Menge der möglichen Interpretationen ein und stützt so den Erkennungsvorgang. Die Interpretation von Fassaden auf der Basis von Scan- und Bilddaten wird in Ripperda & Brenner (2007) gezeigt (s. a. Abb. 9). Die Schwierigkeiten liegen dabei besonders im Bereich der automatischen Gewinnung der Modellrepräsentation, wobei das Ziel ein gleichzeitig hinreichend einschränkendes und hinreichend generisches Modell ist. Grammatikbasierte Modelle besitzen ebenfalls mögliche Anwendungen im Bereich der Generalisierung von Objekten, da hierbei die im Ableitungsbaum des Objekts enthaltene Information genutzt werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Interpretation von Daten, insbesondere terrestrischer Scandaten, behandelt. Dabei

wurde zunächst der Wandel von der a priori- zur a posteriori-Interpretation beschrieben, welcher neue Werkzeuge erforderlich macht. Eine prinzipielle Unterscheidung der Interpretationsverfahren kann in bottom-up (datengetrieben) und top-down (modellgetrieben) erfolgen, wobei in praktischen Realisierungen meist Mischformen Anwendung finden. Im Bereich der low-level Interpretation werden besonders Punktextraktoren sowie Flächensegmentierverfahren eingesetzt. Zum Bereich der intermediate-level Extraktion kann z.B. das Finden von Zylindern oder Gebäudeprimitiven gezählt werden.

Die high-level Interpretation erfolgt heute (und in naher Zukunft) durch manuelle Interpretation durch einen Operateur, wobei der Rechner unterstützende Werkzeuge bereitstellt. In drei Bereichen wurde auf mögliche Entwicklungen hingewiesen. Erstens, bei der Modellierung von Beziehungen zwischen Objektteilen, beispielsweise mittels Bedingungsgleichungen. Zweitens, bei der Modellierung in »generalisierungsfähiger« Form, so dass einmal erfasste Objekte für unterschiedliche Anwendungen verfügbar sind. Und drittens, bei der expliziten Repräsentation von Modellwissen, beispielsweise mittels formaler Grammatiken.

Nach Ansicht des Autors wird die Zukunft durch eine zunehmende Datenflut im Bereich der 3D-Daten gekennzeichnet sein. Vorreiter sind heute Dienste wie Google Earth, Google Maps und Microsoft Virtual Earth, welche nicht nur Karten und Luftbilder, sondern vermehrt auch Fassadenbilder (Schrägluftbilder bei Microsoft Virtual Earth) und Straßenansichten (Google Maps) bereitstellen. Diese Datenflut wird in Zukunft sicherlich ergänzt werden durch dreidimensionale Punktwolken, welche mittels terrestrischem Laserscanning, videobasiertem Punktmatching oder der jüngst verfügbaren Tiefenbildkameras gewonnen werden.

Auch bei den Anwendungen kann man sich massive Veränderungen vorstellen. So ist das Ziel einer Erfassung heute meist die Erstellung eines CAD-Modells in hoher Qualität, was – wie dargelegt – heute und in naher Zukunft einen hohen manuellen Arbeitsanteil verursachen wird. Auf der anderen Seite ergeben sich im Bereich des Bildrenderings Alternativen, beispielsweise durch surfel/point splat Verfahren (Pfister et al. 2000), welche eine Interpretation der Punktwolke überflüssig machen. Auch bei der Nutzung außerhalb des Renderings ergeben sich Alternativen, welche nur eine Teilinterpretation der Punktwolken erforderlich machen. Beispielsweise haben Brenner & Dold (2007) die Anfelderung von Datensätzen anhand automatisch extrahierter Ebenenstücke untersucht. Derartige Verfahren besitzen auch Potenzial für die hochgenaue Positionsbestimmung von Kraftfahrzeugen, welche Bestandteil zukünftiger Fahrerassistenzsysteme sein wird (Weiss et al. 2006).

Dank

Die Nachwuchsgruppe des Autors wird von der VolkswagenStiftung gefördert.

Literatur

- Barnea, S., Filin, S.: Registration of Terrestrial Laser Scans via Image Based Features. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52), 32–37, 2007.
- Beinat, A., Crosilla, F., Sepic, F.: Automatic morphological pre-alignment and global hybrid registration of LiDAR close range images. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 5), Dresden, 2006.
- Bendels, G.H., Degener, P., Wahl, R., Körtingen, M., Klein, R.: Image-Based Registration of 3D-Range Data Using Feature Surface Elements. In: The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2004), 115–124, 2004.
- Besl, P.J., Jain, R.C.: Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10(2), 167–192, 1988.
- Böhm, J.: Model-based segmentation and recognition from range data. Proc. SPIE Vol. 6051. Optomechatronic Machine Vision, 2005.
- Böhm, J., Becker, S.: Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using Reflectance Features. 8th Conf. on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich, 338–344, 2007.
- Brenner, C.: Interactive Modeling tools for 3D Building Reconstruction. In: Photogrammetrische Woche '99, D. Fritsch, R. Spiller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 23–34, 1999.
- Brenner, C.: Modelling 3D Objects using Weak CSG Primitives. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (Part B3), 1085–1090, 2004.
- Brenner, C.: Building reconstruction from images and laser scanning. In: Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Theme Issue on »Data Quality in Earth Observation Techniques«, 6(3–4), März 2005, Elsevier, 187–198, 2005.
- Brenner, C.: Constraints for Modelling Complex Objects, Proc. CMRT'05, In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W24), 49–54, 2005.
- Brenner, C., Dold, C.: Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36, (Part 3/W52), 84–89, 2007.
- Dold, C., Brenner, C.: Automatic Matching of Terrestrial Scan Data as a Basis for the Generation of Detailed 3D City Models. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (Part B3), 1091–1096, 2004.
- Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A., Förstner, W., Plümer, L., Steinhage, V.: Extracting buildings from aerial images using hierarchical aggregation in 2D and 3D. Comp. Vision Image Understand. 72(2), 195–203, 1998.
- Fischler, M.A., Bolles, R.C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communications of the ACM 24(6), 381–395, 1981.
- Förstner, W.: 3D-city models: automatic and semiautomatic acquisition methods. In: Photogrammetrische Woche '99, D. Fritsch, R. Spiller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 291–303, 1999.
- Grün, A.: Automation in Building Reconstruction. In: Fritsch, D. & D. Hobbie (Eds.): Photogrammetric Week '97, Wichmann Verlag, Heidelberg, 175–186, 1997.
- Hoover, A., Jean-Baptiste, G., Jiang, X.Y., Flynn, P.J., Bunke, H., Goldgof, D.B., Bowyer, K., Eggert, D.W., Fitzgibbon, A., Fisher, R.B.: An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(7), 673–689, 1996.
- Horn, B.K.P.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: Journal of the Optical Society of America 4(4), 629–642, 1987.
- Hough, P.V.C.: Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Pat. 3069654, 1962.
- Jiang, X.Y., Bunke, H.: Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping. Technischer Bericht IAM-92-006, Institut für Informatik und angewandte Mathematik, Universität Bern. 1992.
- Kada, M.: 3D Building Generalization based on Half-Space Modeling. ISPRS Workshop on Multiple Representation and Interoperability of Spatial Data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 2/W40), 58–64, 2006.
- Kolbe, T.H., Gröger, G.: CityGML – OGC konforme Standards für 3D-Stadtmodelle. Tagungsband Praktische Kartographie, Kartographische Schriften, Band 12, Kirschbaum Verlag, Bonn, 103–117, 2006.
- Kukko, A., Andrei, C.-O., Salminen, V.-M., Kaartinen, H., Chen, Y., Rönnholm, P., Hyypä, H., Hyypä, J., Chen, R., Haggrén, H., Kosonen, I., Čapek, K.: Road Environment Mapping System of the Finnish Geodetic Institute – FGI Roamer. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52), 241–247, 2007.
- Lowe, D.G.: Distinctive image features from scale-invariant key points. International Journal of Computer Vision, 60(2), 91–110, 2004.
- Nistér, D.: Automatic Dense Reconstruction from Uncalibrated Video Sequences. Doktorarbeit, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2001.
- Parish, Y.I.H., Müller, P.: Procedural modeling of cities. SIGGRAPH 2001, 301–308, 2001.
- Pfister, H., Zwicker, M., van Baar, J. and Gross, M.: Surfels: Surface elements as rendering primitives. In: K. Akeley (ed.), Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings, ACM SIGGRAPH, 335–342, 2000.
- Rabbani, T., van den Heuvel, F.: Efficient Hough Transform for Automatic Detection of Cylinders in Point Clouds. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W19), 60–65, 2005.
- Rabbani, T.: Automatic Reconstruction of Industrial Installations Using Point Clouds and Images, Doktorarbeit, TU Delft, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy 62, 2006.
- Ripperda, N., Brenner, C.: Data driven rule proposal for grammar based façade reconstruction, PIA'07. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W49A), 1–6, 2007.
- Roth, G.: Registering two overlapping range images. Proc. of the Second International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99), Ottawa, Kanada, 191–200, 1999.
- Sansó, F.: An exact solution of the roto-translation problem. In: Photogrammetria 29(6), 203–216, 1973.
- Sester, M., Brenner, C.: Continuous Generalization for Visualization on Small Mobile Devices. In: Peter Fisher (Ed.): Developments in Spatial Data Handling – 11th International Symposium on Spatial Data Handling, Springer Verlag, 469–480, 2004.
- Sithole, G., Vosselman, G.: Automatic structure detection in a pointcloud of an urban landscape. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, URBAN 2003, Berlin, 67–71, 2003.
- Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W., Baron, A.: Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (Part B7), 990–995, 2004.
- Thiemann, F.: 3D-Gebäude-Generalisierung. In: Kartographische Schriften, Band 7, Visualisierung und Erschließung von Geodaten, Seminar GeoVIS 2003, 27.–28. Februar 2003, Hannover, 185–192, 2003.
- Ulrich, A., Schwarz, R., Kager, H.: Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91(4), 271–280, 2003.
- Weiss, T., Wender, S., Dietmayer, K.: Präzise Positions- und Zustands-schätzung eines Fahrzeugs mit Hilfe eines Laserscanners und detaillierten digitalen Karten, 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme. In: C. Stiller, M. Maurer (Hrsg.), Löwenstein/Höblinsülz, Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., 1–10, 2006.
- Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F.X., Ribarsky, W.: Instant Architecture. ACM Trans. Graph 22(3), 669–677, 2003.

Anschrift des Autors

Dr.-Ing. Claus Brenner
 Institut für Kartographie und Geoinformatik
 Leibniz Universität Hannover
 Appelstraße 9a, 30167 Hannover
 claus.brenner@igk.uni-hannover.de