

Segmentierung, Rekonstruktion und Datenfusion bei der Objekterfassung mit Entfernungsdaten – ein Überblick

Hanns-F. SCHUSTER, Wolfgang FÖRSTNER

Zusammenfassung

Mit dem Aufkommen von flächig erfaßten Entfernungsdaten im Vermessungswesen steht ein Paradigmenwechsel in der Auswertung und Verarbeitung dieser Daten an, vergleichbar dem Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie mit der Verfügbarkeit digitaler bzw. digitalisierter Bilder. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über Verfahren zur Fusion und Segmentierung von Entfernungsdaten und verdeutlicht Potentiale zur weiteren Automatisierung

1 Paradigmenwechsel im Vermessungswesen?

Durch den Einsatz von terrestrischen Laserscannern oder anderen flächig erfassenden Entfernungssensoren (Luan 2001) wird die übliche Verarbeitung der aufgenommenen Daten stark verändert. Die Änderung bezieht sich vor allem auf die Bedeutsamkeit und der Art der Verarbeitung der aufgenommenen Daten.

Dort, wo zuvor einzelne, vom Operateur ausgesuchte Punkte mit dem Tachymeter manuell angezielt wurden und mit ihrer Bedeutung im Feldbuch festgehalten wurden, wird jetzt eine sehr große Zahl von Punkten gemessen, von denen jeder nur eine sehr geringe Information trägt. Das Objekt, welches zuvor geometrisch durch bedeutungsvolle Punkte, z. B. Eckpunkte einer Fassade, definiert war, wird jetzt durch eine Punktwolke ersetzt, die die Fläche beschreibt, aber primär keine Auskunft über geometrische Abgrenzungen oder gar ihre Bedeutung liefert. Erst durch eine Interpretation der Daten ist man in der Lage, aus den aufgenommenen Punkten Flächen, Kanten oder Eckpunkte zu bilden, diese miteinander zu verknüpfen und ihnen eine für die Anwendung relevante Bedeutung zuzuweisen.

In Abb. 1 ist die Wertschöpfungskette exemplarisch dargestellt. Der Rechner hat durch die Daten unmittelbar Zugriff zu allen Messungen. Im Prinzip ist der Ablauf von der Erfassung bis zur Visualisierung daher voll automatisierbar. Der Nachteil, daß pro Punkt viel weniger semantische Information vorhanden ist als bei Tachymetermessungen, wird durch die deutlich höhere Menge der Punkte und den Einsatz von automatischen Auswerteverfahren mehr als aufgewogen.

Dieser Paradigmenwechsel ist vergleichbar mit dem Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie in den 80-er Jahren und dem Übergang der Erfassung von digitalen Geländemodellen von Luftbildern zu flugzeuggetragenen Laser Abtasterrdaten. Während bei der analytischen Photogrammetrie Datenmengen im Bereich von einigen Kbyte auftraten, liegen heutige Projekte der digitalen Photogrammetrie bei Datenmengen

im 100 Gbyte-Bereich. Während man zur Erfassung von Digitalen Höhenmodellen mit photogrammetrischen Verfahren ca. 1000 Punkte pro qkm DHM erfaßt, fallen bei der Laserabtastung Punktwolken im Bereich von 1 Mio. Punkten an. Ähnlich drastisch ist der Übergang bei der terrestrischen Aufnahme mit Laserabstern.

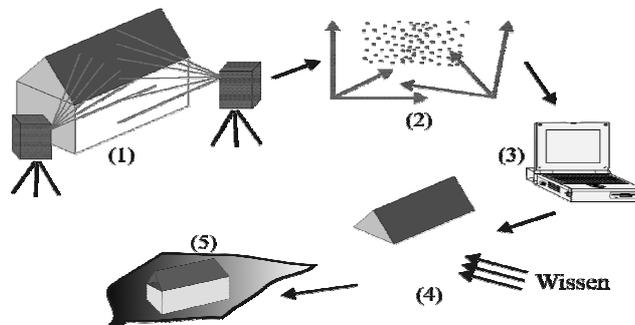


Abbildung 1: In der geodätischen Wertschöpfungskette wird ein Objekt, etwa ein Gebäude, von mehreren Standpunkten aus eingemessen (1). Der Laserscanner liefert pro Standpunkt eine das Objekt beschreibende Punktwolke in einem lokalen Koordinatensystem (2). Die so entstehenden Punktwolken müssen anschließend zu einem einzelnen Datensatz fusioniert werden. Um die Geometrie des Objekts anschließend rekonstruieren zu können, muß der Datensatz in sinnvolle Teile partitioniert werden (3). Das nun in einer symbolischen Beschreibung vorliegende Objekt (4) kann dann mit zusätzlichem Wissen, insbesondere über eine Interpretation, veredelt und anschließend visualisiert oder anders weiterverwendet werden.

Die Auswirkungen des Paradigmenwechsels von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie ist in der folgenden Tabelle gegenübergestellt. Die radikalen Veränderungen bei der Messung der Orientierung und der Interpretation der Daten sind in ähnlicher Weise beim Einsatz von Laserabstern im Vermessungswesen zu erwarten.

Über die zum Prozessieren von solchen Daten notwendigen Verfahren soll im Folgenden ein Überblick gegeben werden. Dabei kommen den folgenden Aufgaben eine besondere Bedeutung zu:

1. Die Fusion der verschiedenen Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem.
2. Die Segmentierung des Gesamtdatensatzes in sinnvolle geometrische oder auch inhaltliche Segmente.
3. Die Interpretation der so erhaltenen Segmente i. S. einer Objektbildung.

Von den drei Aufgaben ist die Fusion (1) zwar die einfachste, jedoch gibt es bisher keine allgemein akzeptierten vollautomatischen Lösungen. Dagegen kann man nicht in naher Zukunft keine vollautomatischen Interpretationsalgorithmen (3) erwarten. Für die Segmentierung (2) der Daten existieren jedoch eine große Zahl von Verfahren, die – bei aller Unterschiedlichkeit in den Voraussetzungen – als Grundlage für eine halbautomatische Interpretation, d. h. Objektbildung dienen können.

Wir behandeln im folgenden zunächst Verfahren zur automatischen Fusion von Punktwolken. Sie können von der anschließend diskutierten Segmentierung profitieren.

Tabelle 1: Wirkung des Paradigmenwechsels zur digitalen Photogrammetrie

	vor Digitalisierung	nach Digitalisierung
	<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle Messung 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Messung
Orientierung	<ul style="list-style-type: none"> • numerierte Verknüpfungspunkte • nur Punkte als Beobachtung 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht numerierte Verknüpfungspunkte • auch abgeleitete Beobachtungen
Digitales Oberflächenmodell	<ul style="list-style-type: none"> • wenige Einzelpunkte • viel Information pro Punkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Massenmessung • kaum Information pro Punkt
	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretation manuell 	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretation teilweise durch Rechner

2 Datenfusion

Am Anfang jeder Auswertung steht die Fusion der in den verschiedenen, lokalen Koordinatensystemen gemessenen Daten in einen gemeinsamen sich auf ein einheitliches Koordinatensystem beziehenden Datensatz. Dies besteht in der Berechnung der entsprechenden Transformationsparameter, wie bei der Orientierungsbestimmung in der Photogrammetrie.

Aufgrund der Aufnahmecharakteristik des Laserscanners ist nicht davon auszugehen, daß ein und der selbe Objektpunkt in beiden Datensätzen gemessen wird. Darüber hinaus Des weiteren haben die Punkte in den Datensätzen keine Identifikationsnummer, wie bei manuellen Messungen üblich, auch haben sie keine spezifischen Merkmale, die helfen könnten, das Objekt, welches sie abbilden, zu identifizieren.

Die Zuordnung der einzelnen Datensätzen muß daher über die lokale Oberflächenstruktur des Objekts erfolgen, die i. a. aus den Punktwolken ableitbar ist. Das Zuordnungsproblem ist daher außerordentlich schwierig. Die Schwierigkeit des Zuordnungsproblems kann man sich vergegenwärtigen, wenn man die lokalen Messungen von Punkten bei der freien Stationierung ohne Kenntnis der Punktnummern fusionieren müßte, wobei man – günstigerweise - von identischen Punkten in benachbarten Standpunkten ausgehen könnte. Da die Punkte i. A. nicht korrespondieren, läßt sich eine Lösung des Zuordnungsproblem aus den Punkten nur approximativ und unter der Annahme, daß die Punkte dicht liegen, herbeiführen.

Vertreter für eine solche Lösung sind die sog. 'iterative closest point' (ICP) Verfahren. In dieser Verfahrensgruppe werden zwei Punktwolken so orientiert, daß die Summe der

Quadrate der Punktabstände $d(P_i, P_j)$ beider Datensätze minimiert wird. Die Quadratsumme bezieht sich auf korrespondierende Punktpaare in den beiden Datensätzen. Dabei wird angenommen, daß die Punkte so dicht liegen, daß der Fehler, den man bei der Zuordnung von – eigentlich nicht korrespondierenden - Meßpunkten macht, vernachlässigbare Auswirkungen auf die Transformation hat. Es handelt sich also im strengen Sinne um ein Näherungsverfahren.

Statt die Abstände $d(P_i, P_j)$ der Punkte zu bewerten sollte man besser die Abstände $d(P_i, F_j)$ und $d(F_i, P_j)$ der Punkte von der anderen Fläche bewerten. Allerdings ist dazu eine lokale Interpolation der Punkte in beiden Systemen erforderlich.

Diese iterativen Verfahren sind jedoch von guten Startwerten abhängig und können sich bei manchen Konfigurationen in lokalen Minima verfangen, so daß die optimale Konfiguration u. U. nicht erreicht wird.

Eine mögliche Lösung dieses Problems stellt der Rückgriff auf abgeleitete Beobachtungen dar. Dafür werden aus den Punktwolken Merkmale wie Linien oder Flächen extrahiert, die dann für die Korrespondenzsuche benutzt werden (Medioni/Tang '99). Die automatische Bestimmung von Startwerten gliedert sich i. a. in die folgenden Verfahrensschritte:

1. zunächst werden Merkmale in beiden Datensätzen extrahiert. Dafür kann man auf die Ergebnisse einer Segmentierung zurückgreifen.
2. die extrahierten Merkmale werden auf der Basis ihrer lokalen Ähnlichkeiten vorläufig zugeordnet. Diese Zuordnung ist weder eindeutig noch vollständig.
3. aus der vorläufigen Zuordnung wird eine konsistente eins-zu-eins Zuordnung berechnet.

Die in der Literatur vorgestellten Verfahren unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf die gewählten Merkmale, die von der Art der Oberfläche und den erwarteten Störungen abhängen, und die Strategie der Zuordnung, die vor allem auf die Eindeutigkeit der extrahierten Merkmale und ihre erwartete Zahl Rücksicht nimmt (Krsek et al. '02, Tarel et al. '99, Eggert et al. '96).

Im Folgenden stellen wir ein für diese Vorgehensweise repräsentatives Verfahren zur Näherungswertbestimmung für die Fusion von Datensätzen vor (Wyngaert et al. 2002). Es ist speziell für Freiformflächen konzipiert.

Bei diesem Verfahren werden zunächst Merkmale extrahiert. Als Merkmale dienen Paare von Bitangenten-Linien, die danach zugeordnet werden. Bitangenten-Punkte sind Punkte einer Fläche, die die gleiche Tangentialebene aufweisen (Abb.2 links). Bitangenten-Linien enthalten punktweise zugeordnete Bitangentenpunkte (Abb.2 rechts). Diese Linien sind invariant gegenüber affinen Transformationen.

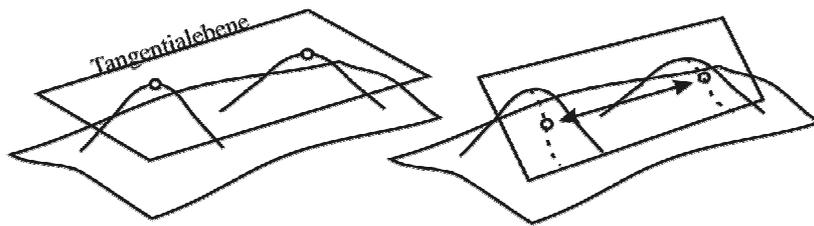


Abbildung 2: Bitangenten-Linien entstehen durch Verschiebung der Tangentialebene und Verfolgung der Wege der beiden Tangentialpunkte

Das Berechnen von solchen Bitangentenpunkten läßt sich im Zweidimensionalen leicht verdeutlichen (Abb. 3). Dazu kodiert man die Tangente an jedem Punkt der zu untersuchenden Kurve in Hesse'scher Normalform (ϑ, d) . Die Menge der Tangenten bildet im ϑ - d -Raum eine Kurve. Die Punkte, an denen sich die Kurve selbst schneidet, sind die gesuchten Bitangentenpunkten.

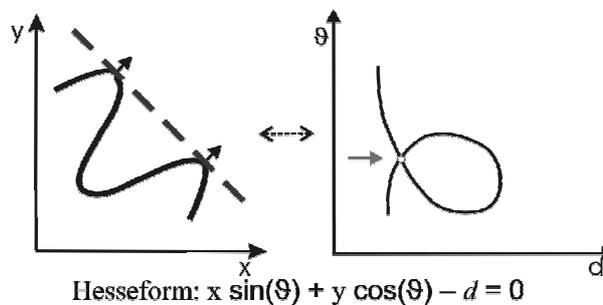


Abbildung 3: Das Auffinden von Bitangentenpunkten. Links die Kurve, rechts der zugehörige ϑ - d -Raum.

Für die vorläufige Zuordnung korrespondierender Paare von Bitangentenkurven wird die Distanzfunktion korrespondierender Tangentenpunkte benutzt. Die optimale Zuordnung wird anschließend über die Abstände der Oberflächen berechnet. Das Verfahren wurde erfolgreich für Entfernungsdaten von Gesichtern angewandt.

Im Falle von polyedrischen Oberflächen müßte das Verfahren modifiziert werden. Statt der Bitangentenkurven kann man jedoch Paare windschiefer Raumgeraden in beiden Datensätzen verwenden. Sie werden durch Abstand und Winkel charakterisiert, so daß diese Merkmale für die Zuordnung verwendet werden können. Darüber hinaus kann man aus der Zuordnung nur eines Paares windschiefer Geraden die dreidimensionale Koordinatentransformation berechnen, wobei das offene Vorzeichen der Drehung durch eine weitere Gerade oder Ebene bestimmt werden kann.

3 Segmentierung

Die Punktwolke stellt das Objekt bildlich dar, wie die unmittelbare Visualisierung suggeriert, ohne die Daten in irgendeiner Form zu gliedern. Die Objektbildung kann automatisch nur in Stufen erfolgen, meist in der Form der Aggregation zu komplexeren Einheiten, die gleichzeitig auf einer höheren Ebene interpretierbar sind. Verfahren, die die Ableitung einer solchen symbolischen Beschreibung, im einfachsten Fall einer Liste geometrisch und thematisch attributierter Objekte, vorbereiten und eine erste Zusammenfassung der Originaldaten durchführen nennt man Segmentierverfahren.

Der Begriff Segmentierung umfaßt eine Reihe verschiedener Verfahren zur Ableitung einer ersten symbolischen Beschreibung, die sich in zwei große Klassen einteilen lassen:

- Die Detektion und Identifikation von geometrischen Elementen, wie Punkte, Kanten oder Flächen, und
- die Partitionierung der Daten in sich nicht überlappende Teile.

Beide Aufgaben haben in unserem Kontext praktische Bedeutung. Obwohl es eine Reihe brauchbarer Begriffsdefinitionen gibt, ist die Zahl der Segmentierungsverfahren unübersehbar. Dies liegt an den jeweiligen praktischen Anforderungen und an der Schwierigkeit, die Daten in ihrer Vielfalt eindeutig zu charakterisieren.

Wir wollen im folgenden nur das Problem der Partitionierung behandeln. Hier ist das Ziel, diejenigen Bereiche des Datensatzes zusammenzufassen, die nach einem zu definierenden Kriterium als homogen identifiziert werden und – als Vorbereitung einer Objektbildung - geometrische Elemente repräsentieren. Eine Partitionierung besteht in einer i. a. nicht festgelegten Zahl von sich gegenseitig nicht überlappenden Regionen, die den ganzen Datensatz beschreiben.

(1) Entscheidend bei der Segmentierung sind die Homogenitätsmaße, nach denen entschieden wird, welche Bereiche des Datensatzes zu Regionen zusammengehören und wo eine Trennung vorgenommen werden muß. Die in der Literatur dokumentierten Homogenitätskriterien beurteilen eine Vielzahl an direkten und indirekten Merkmalen. Die einfachsten Vertreter prüfen auf Gleichheit, z. B. der Normalen, d. h. auf Ebenheit oder fassen die Bereiche mit konstantem Krümmungsverhalten (Besl/Jain '86) zusammen. Des weiteren wird auch auf Abweichungen von einem zu Grunde liegenden geometrischen Modell, z. B. Zylinder, Kugel oder Kegel, geprüft (Boyer et al. '94). Oder es werden komplexere Merkmale wie die Glattheit und Länge des Randes zur Verbesserung der Segmentierung hinzugenommen (Wani/Batchelor '94).

(2) Kern der Segmentierungsverfahren sind oft robuste Schätzverfahren, da bei der Identifikation lokaler Regionen z. T. mit mehr als 50 Prozent an Ausreißern zu rechnen ist (Rousseu/Leroy '87). Dies ist nicht in der Qualität der durch die Geräte gelieferten Daten, sondern in der Trennung der homogenen Bereiche von den inhomogenen Bereiche im Datensatz begründet. Prüft man etwa bei der Aufnahme einer Fassade die Daten auf Homogenität bezüglich einer Ebene, so werden alle Punkte außerhalb dieser Ebene als Ausreißer klassifiziert. Hierbei kommen alle Formen von direkten Schätzverfahren zur

Anwendung wie etwa das sog. 'random sample consensus' (RANSAC, s. Fishler/Bolles 1981), bei dem ein minimaler Satz richtiger Punkte gesucht wird oder Least Median Square (LMedS) Schätzer, die eine robuste Fehlernorm verwenden.

(3) Ein weiterer Gesichtspunkt zur Beurteilung eines Segmentierungs-Algorithmus ist die Segmentierungs-Strategie. Sie legt fest, wie mit den Daten, die durch das Homogenitätskriterium beurteilt wurden, verfahren wird. Es existieren drei Aspekte komplementärer Vorgehensweisen:

- a) Teilen <-> Aggregieren
- b) sequentielles <-> paralleles Vorgehen
- c) Ortsraum(2.5D, 3D) <-> Merkmalsraum

Eine Teilungs-Strategie (a) teilt den ursprünglichen Datensatz solange, bis die entstehenden Regionen dem Homogenitätskriterium genügen. Die Aggregations-Strategie geht dagegen von den einzelnen Punkten aus, die dann zu immer größeren Regionen verschmolzen werden. Ein Mischalgorithmus, der beide Strategien hintereinander anwendet ist in Abb.4 dargestellt.

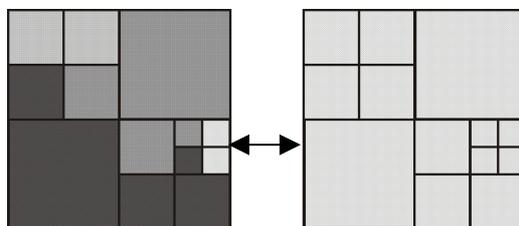


Abbildung 4: Split&Merge-Verfahren. Der Datensatz wird solange mittels eines Quadrees unterteilt, bis er dem Homogenitätskriterium entspricht. Anschließend werden benachbarte gleiche Teile wieder zusammengefaßt.

Dabei kann entweder eine Stelle prozessiert werden (b) bis das Homogenitätskriterium einschreitet, z.B. beim Bereichswachstumsverfahren, oder es werden viele Regionen parallel bearbeitet, z. B. bei Segmentierungen mittels eines Quadtree oder Octree. Der unter (c) aufgelistete Aspekt würdigt die betrachteten Nachbarschaften. So werden in vielen Algorithmen nur räumlich benachbarte Pixel bewertet. Damit können nur zusammenhängende Komponenten gefunden werden. Wenn dagegen zu der Auswertung auch andere Merkmale auf Nachbarschaft geprüft werden, können komplexere, u. U. nicht zusammenhängende, aber ihrer Charakteristik nach ähnlich Objekte identifiziert werden.

Als repräsentatives Beispiel soll hier das Segmentierungsverfahren nach (Flynn/Jain 1987) vorgestellt werden. Der Ansatz ist einer der ersten und dient vielen anderen Segmentierungsalgorithmen als Grundlage. Er beruht auf einem Bereichswachstumsverfahren. Im Homogenitätskriterium werden die räumliche Nähe unter den Punkten und die Ähnlichkeit der Normalen bewertet. Der Algorithmus interpretiert aus Effizienzgründen die Daten als 2,5-dimensional und verwendet eine Achter-Nachbarschaft. Im sich daraus ergebenden sechs-dimensionalen Merkmalsraum (je drei Parameter für die Position und die Normale) werden anschließend gleiche Datenbereiche zusammengefaßt, wobei eine geringe Streuung in den Merkmalen pro Region zugelassen wird. Diese Bereiche werden anschließend als ebene und glatte (nicht ebene) Bereiche klassifiziert. Um zu kleine Regionen auszuschließen, d. h. eine Übersegmentierung zu vermeiden werden Regionen,

die eine Punktzahl unterschreiten aufgelöst und auf ihre Nachbarn aufgeteilt. Ergebnisse zu diesem Ansatz findet man unter (<http://lotus.cse.nd.edu/~flynn/seg-comp/>).

4 Zusammenfassung

Mit der Verfügbarkeit von Laserabtastern im Vermessungswesen können wir einen Paradigmenwechsel beobachten. Dieser bringt einen erhöhten Automatisierungsgrad in der Aufnahme und Verarbeitung mit sich, falls man über eine unmittelbare Visualisierung der Daten hinausgeht.

Die wichtigsten Verarbeitungsschritte sind die Datenfusion und die Segmentierung als Vorbereitung der Objektbildung. Für beide Aufgaben liegen reichhaltige Erfahrungen zur Automation im Computer Vision und in der Photogrammetrie vor. Während die Datenfusion, d. h. die gegenseitige Orientierung der einzelnen Datensätze in Zukunft vollständig automatisch erfolgen kann, werden die Verfahren zur Segmentierung und die sich daran anschließende Klassifikation von Objektteilen schrittweise automatisch möglich sein und damit die interaktive Objektbildung von komplexen Objekten unterstützen. Erst mit der Automation dieser Verfahren wird das Potenzial der neuen Technik wirtschaftlich wirksam werden.

5 Literatur

- Besl, Jain, *Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Images*, CVGIP vol. 33, 1986, pp. 33 – 80
- Boyer, Mirza, Ganguly, *The robust Sequential Estimator: A General approach and it's Application to Surface Application in Range Data*, IEEE T-PAMI vol. 16, 1994, pp. 987
- Eggert, Fitzgibbon, Fisher, *Simultaneous registration of multiple range views*, in Proc. ICPR, 1996, 770 – 774
- Flynn, Jain, *BONSAI: 3D Object Recognition using constrained search*, IEEE T-PAMI vol. 13, 1991, pp. 1066 – 1075
- Fischler, Bolles, *Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. CACM, 24(6):381–395, June 1981.
- Krsek, Pajdla, Hlavac, *Differential Invariants as the base of triangulated Surface Registration*, CVIU vol. 87, 2002, pp. 27 – 38
- Luan (2001), *Experimental Investigations of Photonic Mixer Device of TOF 3D Ranging Systems Based on PMD Technology*, Dissertation Universität Siegen
- Medioni, Tang, *Robust Estimation of Curvature Information from noisy 3D Data for Shape Description*, Proc. ICCV 1999
- Rousseeuw, Leroy, *Robust Regression and Outlier Detection*. John Wiley & Sons, New York, 1987
- Tarel, Boujema, *A coarse to fine 3D registration method based on fuzzy clustering*, CVIU vol.73, 1999, 14 – 28
- Wani, Batchelor, *Edge-Region Based Segmentation of Range Images*, IEEE T-PAMI vol.16, 1994, pp. 314 – 319
- Wyngeard, VanGool, *Automatic Crude Patch Registration: Toward Automatic 3D Model Building*, CVIU vol. 87, 2002, pp. 8 – 26