

Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen

Anne BIENERT

Zusammenfassung

Die messtechnische Dokumentation von Objekten erfolgt in vielen Anwendungsbereichen, wie Architektur und Denkmalpflege, vorzugsweise in Form von Profilen, welche u.a. aus Laserscannerdaten generiert worden sein können. Aufgrund des Messrauschens ist jeder Laserscannerpunkt mit einem zufälligen Fehler behaftet. Die Größe des Fehlers ist abhängig vom verwendeten Messverfahren des eingesetzten Laserscanners. Um ein rauschfreies Profil zu erhalten, muß es einer Glättung unterzogen werden.

In diesem Beitrag werden entwickelte Glättungsalgorithmen für aus Laserscannerpunktwolken extrahierte Profile, bestehend aus Geradenstücken und Kreisbogenelementen, vorgestellt. Eine Optimierung des Glättungsprozesses wird durch die Anpassung bestimmter Steuerparameter erreicht. Als Ergebnisse liegen ein geglättetes Profil und Informationen über die Genauigkeit der Laserscannerdaten vor, die im weiteren Verlauf vektorisiert werden. Abschließend werden Beispiele von geglätteten Profilen vorgestellt.

1 Einleitung

Durch den Einsatz eines terrestrischen Laserscanners bei der Gebäudeaufnahme kann in kurzer Zeit die komplette Geometrie erfasst werden. Durch Modellierung und Visualisierung dieser Daten zu einem 3D-Model ist es möglich, Informationen über das Objekt zu erhalten. Allerdings können beispielsweise spezielle Maße oder Verläufe von Gebäudemauern entlang einer bestimmten Achse nur schwer entnommen werden. Schnitte in beliebigen Ebenen erleichtern dies. Dabei wird ein Profil erstellt, indem eine Filterung der Punkte in der gewünschten Ebene vorgenommen wird. Das Arbeiten mit Profilen kommt auch der Denkweise und Gewöhnung mancher Anwender geodätisch-photogrammetrischer Produkte entgegen.

Diese generierten Profile bestehen zunächst aus einer Reihe von Punkten, die mit einem zufälligen Fehler behaftet sind. Für diese Arbeit lagen Punktwolken vom Laserscanner LMS Z-420i der Firma Riegl zugrunde. Wie von BÖHLER & MARBS (2004) gezeigt, weisen Punkte in 20 m Entfernung ein Rauschen in Messrichtung von 11 mm auf. Untersuchungen von MULSOW et al. (2004) zeigen ein Messrauschen der Punkte von 7,5 mm bei einer Entfernung von 6 m. Eine Minimierung dieses Wertes erreicht man durch eine Glättung der Punkte. Bei geraden Profilen wird die Glättung durch eine ausgleichende Gerade, wie von LUHMANN (2000) vorgestellt, erzielt. Profile mit einer Krümmung werden über Kreisbogenstücke geglättet.

Aufgrund der Scanauflösung werden Kanten in der Regel nicht exakt getroffen. Werden sie dennoch getroffen, dann ist, bedingt durch die Strahldivergenz des Lasers bei innen-

liegenden Kanten, die Distanzmessung zu kurz, bei den außenliegenden Kanten dagegen zu lang. An den Kanten tritt ein Ausrundungseffekt auf (KERN 2003). In (BECKER 2004) werden Kanten durch Verschneiden von Oberflächen extrahiert. Betrachtet man den zweidimensionalen Fall, ist die tatsächliche Ecke durch einen Geradenschnitt bestimmbar.

2 Glättung extrahierter Profile

2.1 Kantenerhaltende Glättung

Bei der Glättung vorhandener Schnitte wird jeder Laserscannerpunkt einzeln betrachtet. Als Beobachtungen gehen die Nachbarpunkte des zu glättenden Punktes, die innerhalb eines bestimmten Bereiches (Patch) liegen, ein (Abb. 1a). Der zu glättende Punkt befindet sich im Patchmittelpunkt. Inwieweit ein Punkt einer Glättung unterzogen wird, ist abhängig von der Glättungstoleranz. Diese kann zum einen ein fest vorgegebener Wert sein, der sich beispielsweise nach der Messgenauigkeit des verwendeten Laserscanners richtet. Zum anderen ist eine variable Glättungstoleranz möglich. Ausgehend von den Verbesserungen aller Punkte wird eine Standardabweichung berechnet. Liegt die Verbesserung innerhalb der Glättungstoleranz, wird der Punkt geglättet, anderenfalls wird davon ausgegangen, dass dieser Punkt tatsächlich diese Abweichung aufweist.

Befindet sich ein Punkt in der Nähe einer Kante, so gehen Nachbarpunkte, die zu einer anderen Seite der Kante gehören, als Beobachtung mit ein und die ausgleichende Gerade wird verfälscht (Abb. 1b). Eine abgerundete Kante entsteht. Um dies zu umgehen, wird innerhalb der im Patch liegenden Punkte eine weitere Filterung durchgeführt. Durch den Punktmittelpunkt wird eine rotierende Gerade gelegt, die in Abhängigkeit von der Patchgröße in konstanten Winkelschritten rotiert. Für jede Geradenstellung werden die senkrechten Abstände der Punkte bestimmt und die Punkte, die innerhalb einer gewissen Toleranz d_{Tol} von der Gerade liegen gezählt. Der Anstieg der Geraden, welcher die meisten Punkte innerhalb der Toleranz aufweist (Abb. 1c), ist der Näherungsanstieg der ausgleichenden Geraden. In der Ausgleichung werden dementsprechend nur die Punkte innerhalb der Toleranz verwendet.

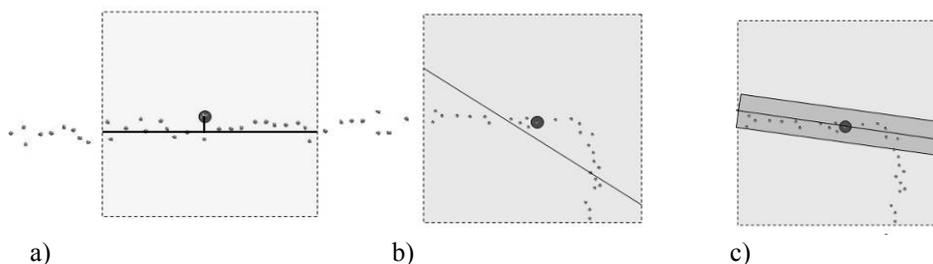


Abb. 1: a) Patch mit ausgleichender Gerade b) Lage der ausgleichenden Geraden in der Nähe einer Kante c) Stellung der rotierenden Geraden mit den meisten Punkten im Toleranzbereich (Näherungsanstieg)

Eine Berechnung der Eckpunkte wird durch den Anstieg der ausgleichenden Geraden realisiert und im Anschluss an die Glättung durchgeführt. Tritt eine signifikante Änderung des Anstiegs auf, wird über einen Geradenschnitt der Schnittpunkt bestimmt. Zu jedem Punkt im Patch gehört ein Anstieg, der aus der jeweiligen ausgleichenden Geraden berechnet wurde. Die Schnittpunktberechnung wird pro Patch so oft durchgeführt, wie Punkte mit ihren jeweiligen Anstiegen vorhanden sind. Allerdings werden nur die Schnittpunkte verwendet, bei deren Berechnung eine Anstiegendifferenz von mehr als 30° aufgetreten ist. Das arithmetische Mittel des mehrfach bestimmten Eckpunktes entspricht dem tatsächlichen Eckpunkt (Abb. 2 rechts). Über die verschiedenen Koordinatenpaare sind Standardabweichungen des vorliegenden Eckpunktes ableitbar, deren Größe deutlich unter der Einzelpunktgenauigkeit der Laserscannerdaten liegt.



Abb. 2: Originalpunktewolke (links) und berechneter Schnittpunkt im glatten Profil (rechts) mit den Koordinaten $X_s \pm \sigma_x$ und $Y_s \pm \sigma_y$

2.2 Steuerparameter

Eine Optimierung des Glättungsprozesses wird durch das Setzen von Steuerparametern erreicht. Zu den Steuerparametern zählen:

- die Patchgröße p ,
- die Glättungstoleranz d_{\max} mit dem Faktor für den Vertrauensbereich,
- die Iterationen der Glättungsdurchgänge und
- die Toleranz d_{Tol} entlang der rotierenden Geraden.

Die Steuerparameter sind der Charakteristik des vorliegenden Profils und der verwendeten Scanauflösung anzupassen. Handelt es sich um überwiegend lange Geraden, ist eine große Patchgröße sinnvoll.

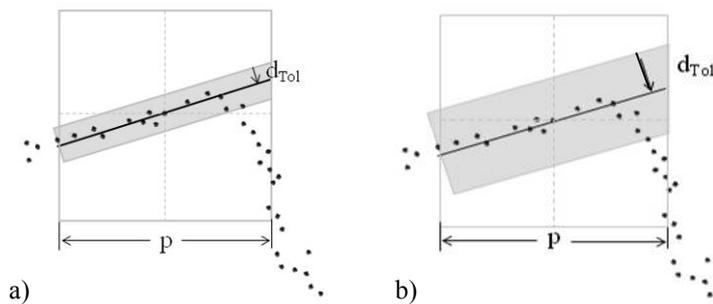


Abb. 3: a) optimale Toleranzbreite d_{Tol} der rotierenden Geraden b) zu große Toleranzbreite

Generell verstärken eine Vergrößerung des Patches und des Vertrauensbereiches sowie eine hohe Anzahl von Iterationen den Glättungsprozess. Um die kantenerhaltende Glättung nicht zu beeinflussen, darf die Toleranzbreite entlang der rotierenden Geraden nicht zu groß gewählt werden. Dies hätte zur Folge, dass die Glättung eines kantennahen Punktes von Punkten einer abgehenden Kante beeinflusst wird (Abb. 3). Ausgerundete Kanten sind die Folge. Grundsätzlich sollte die Toleranz nicht größer als das doppelte Messrauschen des Laserscanners sein.

2.3 Vektorisierung geglätteter Schnitte

Das Profil einer lückenlos aufgenommenen ebenen Oberfläche eines Objektes zeichnet sich bei der Vektorisierung durch ein geschlossenes Polygon aus. Ausgehend von den berechneten Eckpunkten und dem Wissen, dass sich bei einer geschlossenen Oberfläche in einem Eckpunkt jeweils zwei Vektoren schneiden, wird eine automatische Vektorisierung durchgeführt. Als Steuerparameter wird die längste vorhandene Profilstrecke vom Programm abgefragt. Dabei reicht eine Angabe auf Meter genau aus. Wann ein Eckpunkt mit einem weiteren verbunden wird, ist abhängig von der Anzahl der Punkte, die sich auf der Verbindungslinie befinden. Dabei werden Punkte, deren senkrechter Abstand von der Verbindungslinie kleiner als eine vorher definierte Toleranz ist, ebenfalls dazu gezählt. Eine Unterbrechung in der Abfolge der Punkte, hervorgerufen durch Krümmungen (Abb. 4a links) oder Scanschatten (Abb. 4a rechts) entlang der Verbindungslinie ist ebenfalls ein Ausschlusskriterium für die Vektorisierung durch Geradenstücke.

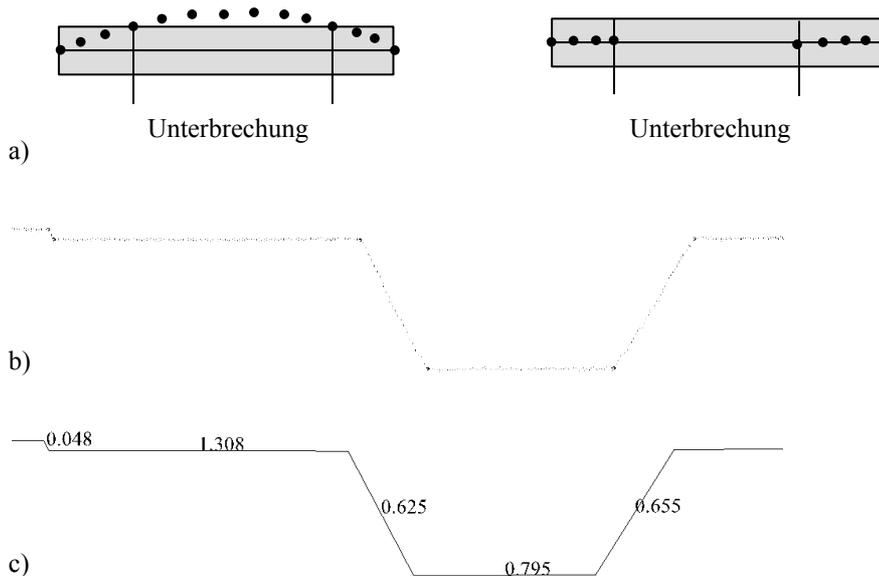


Abb. 4: a) Ausschlußkriterium bei der Vektorisierung (links: überhöhte Darstellung einer Krümmung im geglätteten Profil, rechts: Scanschatten) b) geglättetes Profil einer Fassade mit berechneten Eckpunkten (dicke Punkte) c) vektorisiertes Profil mit automatisch ermittelter Bemaßung

Mit größer werdender Toleranz werden Profilsseiten vektorisiert, die von einem idealen Geradenverlauf abweichen. Betrachtet man vergleichend die Aufnahme eines Objektes mit dem Tachymeter, werden nur diskrete Punkte gemessen, welche die Objektgeometrie repräsentieren. Bei der manuellen Vektorisierung werden die aufgenommenen Punkte durch den Bearbeiter verbunden und kleine Unstetigkeiten im Profilverlauf generalisiert.

Eine krümmungsbasierte Vektorisierung ist bei der Glättung von Kreisen und Kreisbögen möglich. Zunächst wird der Schwerpunkt des Profils bestimmt und der Richtungswinkel vom Schwerpunkt zu jedem Messpunkt berechnet. Eine Sortierung der Punkte nach der Größe der Richtungswinkel ermöglicht das Verbinden benachbarter Punkte. Im Unterschied zu geraden Profilen werden alle geglätteten Punkte bei der Vektorisierung verwendet.

Eine automatische Beschriftung der Vektoren mit Maßen wie Radius, Mittelpunkt-koordinaten und Längen der Profilsseiten (Abb. 4c) ist ebenfalls möglich. Die Einbindung der so erzeugten Schnitte in eine CAD-Umgebung ist momentan über eine VRML-Datei gegeben.

3 Glättungsbeispiele

Abb. 5a zeigt einen gescannten Brunnen als Beispiel für die krümmungsbasierte Glättung. In zwei verschiedenen Höhen wurden Horizontalschnitte extrahiert, welche geglättet wurden. In Abb. 5b sind neben den geglätteten Punkten auch Punkte enthalten, die keiner Glättung unterzogen wurden, da ihre Verbesserungen außerhalb der Glättungstoleranz liegen. Da bei den Schnitten von vornherein eindeutig war, dass es sich um einen Kreis handelt, wurde die Patchgröße so gewählt, dass die Patchseiten größer als die Durchmesser sind. Somit werden zur Berechnung der ausgleichenden Kreisbögen alle Punkte herangezogen. Ein weiteres Endprodukt dieser Glättung sind, neben der Standardabweichung der Verbesserungen, die ausgeglichenen Koordinaten des Mittelpunktes und der ausgeglichene Radius. Die Standardabweichungen der zwei Kreisradien sind 6,9 mm und 7,4 mm.

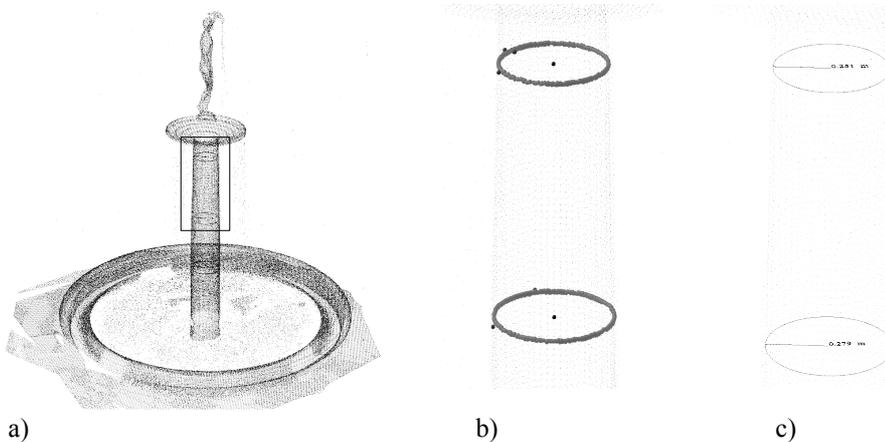


Abb. 5: a) Punktwolke eines Brunnens b) geglättete Profile bestehend aus Punkten c) vektorisierte Profile mit Radius

Als weiteres Beispiel wird im Folgenden die Anwendung der Glättung an der Dresdner Frauenkirche gezeigt. Die Frauenkirche hat eine Grundfläche von ca. 41 m x 41 m. In der Höhe von 127 m über NHN wurde ein 4 cm breites Profil mit ca. 34000 Punkten aus einem Laserscannerdatensatz extrahiert und geglättet. In Abb. 6a ist das horizontale Profil zu sehen. In b) und c) sind Ausschnitte des ungeglätteten und geglätteten Profils abgebildet. Der Datensatz wurde aus 3 Iterationen mit einer variablen Glättungstoleranz und einer Patchgröße von 20 cm generiert.

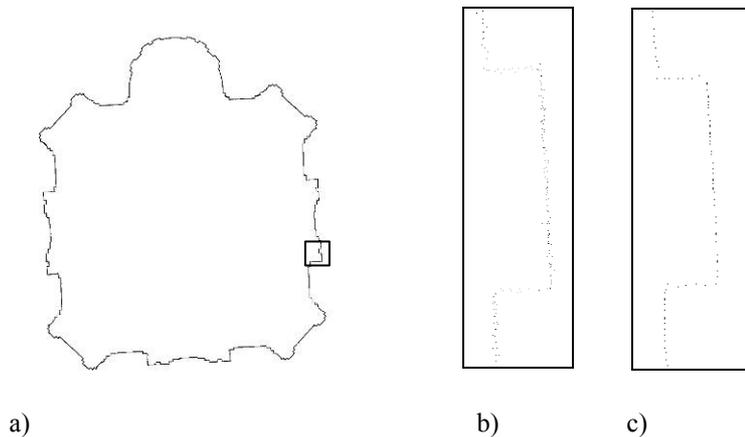


Abb. 6: a) Horizontalschnitt der Frauenkirche b) Ausschnitt der Originalpunkte c) Punkte nach der Glättung

Ein weiteres Beispiel ist die Staumauer Rauschenbach/Sachsen (Abb. 7). Aus der Punktwolke wurde ein horizontaler und vertikaler Schnitt extrahiert. Mit Hilfe der Geradenglättung können Aussagen über die Genauigkeiten der horizontal und vertikal verlaufenden Punkte getroffen werden. Beide Schnitte wurden mit einer Patchgröße von 40 cm und einer Iteration geglättet. Das horizontale Profil besteht aus 752 Punkten und vertikal sind 227 Punkte vorhanden.

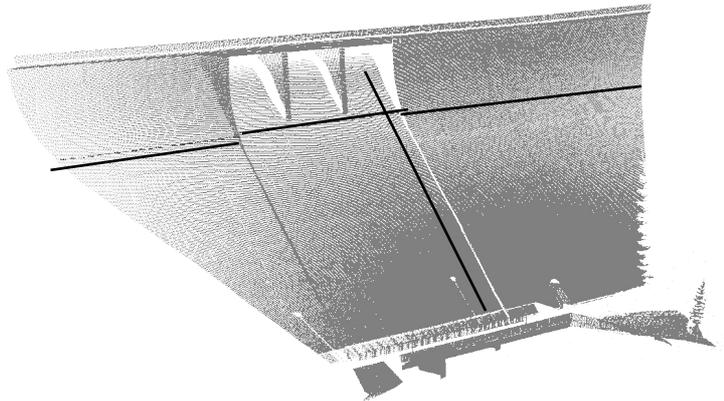


Abb. 7: Punktwolke der Gewichtsstaumauer Rauschenbach (Sachsen)

In den folgenden Tabellen sind die Mittelwerte der erreichten Verbesserungen und Standardabweichungen der Glättung im horizontalen und vertikalen Profil dargestellt. Im Mittel liegen die Verbesserungen der Punkte bei ± 6.3 mm und ± 2.1 mm, was unter der Genauigkeitsangabe des Herstellers des zur Aufnahme verwendeten Laserscanners liegt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Glättung im horizontalen Profil (Entfernung s der Profilmittel vom Scanner $60 \text{ m} < s < 90 \text{ m}$)

Horizontales Profil	Korrektur des Punktes P_i [mm]	m_0 der Ausgleichung [mm]
Mittel	6.3	14.9

Tabelle 2: Ergebnisse der Glättung im vertikalen Profil (Entfernung s der Profilmittel vom Scanner $30 \text{ m} < s < 70 \text{ m}$)

Vertikales Profil	Korrektur des Punktes P_i [mm]	m_0 der Ausgleichung [mm]
Mittel	2.1	1.9

4 Ausblick

Die im Beitrag gezeigten Verfahren ermöglichen die Glättung und Vektorisierung von aus Laserscannerpunktewolken extrahierten Profilen. Sie stellen damit ein wertvolles Werkzeug für die Verarbeitung von Laserscannerdaten dar. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Entwicklung intelligenter Verfahren zur Kombination von Geradensegmenten, Kreisbögen und unmodellierten Einzelpunkten zur Profildarstellung beschäftigen. Darüber hinaus können die entwickelten Verfahren auch auf die Glättung von Flächen und die Objektrepräsentation durch Flächenelemente erweitert werden.

5 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde gefördert durch Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2000 – 2006 und Mittel des Freistaates Sachsen. Des Weiteren danke ich Nikolaus Studnicka (Firma Riegl) für die Bereitstellung der Laserscannerdaten der Dresdner Frauenkirche.

6 Literatur

- Becker, R. (2005): *Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestrischen Laserscannerdaten*. Geodätische Schriftenreihe der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Heft Nr. 63
- Böhler, W. & A. Marbs (2004): *Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner*. In: Luhmann, Th., (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. S. 82-89, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- Kern, F. (2003): *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Heft Nr. 19
- Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- Mulsow, C.; Schneider, D.; Ullrich, A.; Studnicka, N. (2004): *Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems*. In Luhmann, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*. S. 108-113, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- RIEGL Laser Measurement System GmbH, *Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner System LMS-Z420*. <http://www.riegl.com>, 01/2006