

## Registrierung terrestrischer Bild- und LIDAR-Daten für die Dokumentation von Kulturdenkmälern

YAHYA ALSHAWABKEH, NORBERT HAALA & DIETER FRITSCH, Stuttgart

**Keywords:** Close range photogrammetry, cultural heritage, terrestrial photography, terrestrial laserscanning, LIDAR data

**Abstract:** *Registration of terrestrial image and LIDAR data for cultural heritage documentation.* High quality 3D models of cultural heritage sites can be generated efficiently by terrestrial laser scanning, which allows the accurate and dense measurement of surface geometry. In addition to the geometric data collection, texture mapping based on additionally collected digital imagery is particularly important for this type of application. This requires a combined processing of range and image data sets. For this purpose, they have to be registered or aligned by a suitable transformation to a common reference coordinate system. The involved transformation parameters can be determined based on corresponding elements to be extracted from the different data sets. In the article an efficient edge detection algorithm is presented, which allows for the automatic segmentation of such primitives even in complex scenes. In order to achieve a high quality 3D photo-realistic model this alignment process has to be followed by an automatic texture mapping, which is discussed in the second part of the paper. The presented algorithms are demonstrated in the framework of a project aiming at the generation of a 3D virtual model of the Al-Khasneh, a well-known monument in Petra, and a Roman Theatre in ancient Jerash city, Jordan.

**Kurzfassung:** Terrestrisches Laserscanning zur Erfassung von 3D Modellen hat sich unter anderem auch als Standardverfahren für die Dokumentation von Kulturdenkmälern durchgesetzt. Speziell für diese Anwendung ist neben der geometrischen Modellierung die qualitativ hochwertige Texturierung der Objektoberflächen durch zusätzlich erfasste Bilder von besonderem Interesse. Damit ist als erster Auswerteschritt die Transformation der Bild- und Laserdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem erforderlich. Um für diese Registrierung korrespondierende Elemente zwischen den unterschiedlichen Datensätzen bereitzustellen, wurde ein Segmentierungsverfahren zur Extraktion von Kantenelementen entwickelt. Anschließend ermöglicht eine Sichtbarkeitsanalyse die automatische Texturierung des vermaschten 3D Modells. Die im Rahmen des Projektes implementierten Verfahren werden beispielhaft für die Dokumentation von zwei Kulturdenkmälern in Jordanien genutzt.

---

### 1 Einleitung

Terrestrisches Laserscanning ermöglicht eine schnelle, zuverlässige und flächendeckende Erfassung dichter 3D Punktwolken für die effiziente Erfassung von 3D Modellen. Während die Laufzeitmessung reflektierter Laserpulse eine effektive Rekonstruktion der Objektgeometrie erlaubt, ist

für eine Reihe von Anwendungen eine zusätzliche Bereitstellung von Bilddaten erforderlich. Dies gilt insbesondere für Anwendungen zur Dokumentation von Kulturdenkmälern und historischen Bauten. In diesem Bereich werden die erfassten 3D Modelle häufig zur Erstellung hochwertiger Visualisierungen genutzt, was die Verfügbarkeit geeigneter Bildtexturen voraussetzt.

Einige kommerziellen Laserscanner integrieren hierfür bereits eine digitale Kamera und ermöglichen so eine simultane Erfassung von Farbwerten für die gemessenen 3D Punkte. Durch den festen Einbau der Kamera werden jedoch die möglichen Aufnahme-standpunkte auf die Standpunkte des Laserscanners beschränkt. Zudem kann die Erfassung von Laserdaten vor allem für komplexe Objekte und Plätze relativ zeitaufwendig sein. Bei Anwendungen im Freien können sich so erhebliche Änderungen der Lichtverhältnisse ergeben. Die dadurch verursachten radiometrischen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Bildern wirken sich dann störend auf den visuellen Eindruck des texturierten Modells aus. Aus diesen Gründen ist häufig zur optimalen Texturierung eine zeitlich und räumlich getrennte Erfassung von Bildern mit einer unabhängigen Kamera von Vorteil.

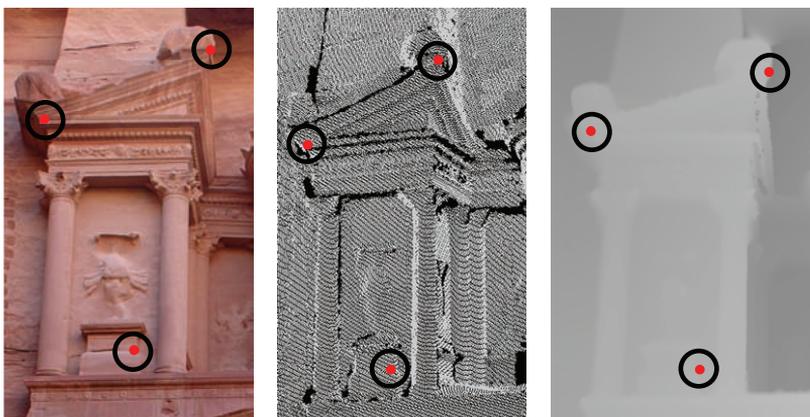
Die Trennung von Laserscanner und Kamera macht jedoch eine aufwändigere Auswertung erforderlich. Während eine integrierte Kamera bei einer ausreichenden Kalibrierung des Gesamtsystems die direkte Verknüpfung der Bilder mit den erfassten 3D Punkten ermöglicht, erfordert die unabhängige Erfassung eine Registrierung der Bild und LIDAR Daten als ersten Auswerteschritt. Dabei werden die Datensätze mittels identischer Elemente zusammengeführt. Zu diesem Zweck werden in dem vorgestellten Ansatz dreidimensionale lineare Strukturen durch ein kantenbasiertes Segmentierungsverfahren aus den LIDAR Daten extrahiert um sie anschließend ihren zweidimensionalen Entsprechungen im Bild zuzuordnen. Nach der Bestimmung der Kameraorientierung durch solche 2D-3D Korrespondenzen kann die Bildtextur direkt auf die zugehörigen 3D Oberflächenelemente projiziert werden. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Textur nur auf den Oberflächenelementen aufgebracht wird, die in der jeweiligen Aufnahme tatsächlich sichtbar sind. Die hierfür notwendige Verdeckungsanalyse ist für einfache Objektgeometrien einfach lösbar. Bei der Dokumentation von Kulturdenkmälern werden jedoch häufig dichte 3D Punktwolken erfasst, die zu Ober-

flächen vermascht werden. Solche Objektrepräsentationen beinhalten somit eine sehr große Anzahl von Flächenelementen. Dies erfordert die Verfügbarkeit eines effizienten Algorithmus zur Lösung des Sichtbarkeitsproblems, wie er im zweiten Teil des Artikels vorgestellt wird.

## 2 Merkmalsextraktion und Registrierung

Um eine vollständige Erfassung räumlich komplexer Objekte zu gewährleisten, werden terrestrische Laserdaten in der Regel von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen. Die einzelnen Punktwolken sind somit durch räumliche Transformationen zusammenzuführen und gegebenenfalls in ein übergeordnetes Koordinatensystem einzubinden. Bei ausreichender Überdeckung der einzelnen Scans ist eine Registrierung durch Verfahren wie den Iterative Closest Point Algorithmus möglich [BM92]. Häufig werden auch künstliche ebene oder kugelförmige Signale im Objektraum angebracht und so durch semi-automatische Messung Paß- und Verknüpfungspunkten bereitgestellt. Solche Signale können auch zur Registrierung der Bilddaten verwendet werden. Neben dem Aufwand für die Signalisierung entstehen dadurch jedoch unter Umständen störende Verdeckungen im Texturbild. Aus diesem Grund ist für die Registrierung der Bild und LIDAR Daten eine Nutzung korrespondierender Elemente anzustreben, die sich direkt aus den aufgenommenen Objektstrukturen extrahieren lassen [LHS00].

Üblicherweise werden in photogrammetrische Anwendungen korrespondierende Punkte zur Rekonstruktion der äußeren Orientierung genutzt. Wie Abb. 1 für einen Objektausschnitt demonstriert, der sowohl mittels Laserscanner als auch unabhängiger Kamera erfasst wurde, lassen sich geeignete Punkte in Bildern relativ gut bestimmen. Demgegenüber ist eine exakte Definition und Messung der zugehörigen Punkte in den Laserdaten nahezu unmöglich. Dies gilt sowohl für die in Abb. 1 Mitte abgebildete 3D



**Abb. 1:** Identische Punkte im Intensitätsbild, 3D Punktwolke und Distanzbild.

Punktwolke als auch für das rechts dargestellte Distanzbild, das sich aus einer Anordnung der LIDAR Messungen in einem regelmäßigen Raster ergibt.

Aufgrund der Probleme bei der exakten Identifizierung von Punktmerkmalen ist die erreichbare Messgenauigkeit für eine exakte Registrierung häufig nicht ausreichend [LS05]. Im Gegensatz dazu lassen sich linienförmige Strukturen genauer extrahieren und messen [CH99], [LH02]. Solche Kantenstrukturen sind in künstlichen Bauten in ausreichender Zahl vorhanden und erlauben eine zuverlässige Bestimmung der Kameraorientierung durch räumlichen Rückwärtschnitt. Aus diesem Grund wurde ein Segmentierungsalgorithmus zur effektiven Extraktion solcher Kantenstrukturen aus Distanzdaten entwickelt.

### 2.1 Krümmungsbasierte Segmentierung von Distanzbildern

Häufig werden zur Segmentierung von LIDAR Daten Distanzbildern statt ungeordneter 3D Punktwolken genutzt. Distanzbilder werden unter Beibehaltung der Topologie der ursprünglichen Scans erzeugt, so dass Nachbarschaftsbeziehungen zwischen einzelnen Punktmessungen implizit zur Verfügung stehen. Diese Form der Repräsentation ermöglicht somit im Vergleich zu 3D Punktwolken eine einfachere Implementie-

rung von Segmentierungsalgorithmen analog zu bildbasierten Verfahren. Ähnlich zur Segmentierung von Bildern können die Ansätze zur Distanzdatensegmentierung in regionen- und kantenbasierte Verfahren unterteilt werden. Einen Überblick über regionenbasierte Verfahren, die einzelne Distanzmessungen aufgrund eines Homogenitätskriteriums zu größeren Bereichen gruppieren, findet sich beispielsweise in [HJJ\*96] und [MLM01]. Im Gegensatz zu der damit möglichen Segmentierung glatter oder ebener Flächenstücke gestaltet sich die direkte Extraktion von Kanten recht schwierig. Neben der eingeschränkten räumlichen Auflösung führen vor allem fehlerbehaftete Punktmessungen an Kanten durch Mehrfachreflexionen zu Problemen [SD01]. Um dennoch solche gut zur Registrierung von Bild und Distanzdaten geeigneten linearen Strukturen zu extrahieren, wurde ein auf der Analyse der mittleren Krümmung basiertes Verfahren entwickelt. Dabei wird zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit die Lokalisierung von Kanten in unterschiedlichen Maßstäben mit einer nachfolgenden Skeletisierung verknüpft. Da sich die Mittlere Krümmung aus dem arithmetischen Mittel der beiden Hauptkrümmungen ergibt, ist sie geringfügig stabiler gegenüber Rauschen. Zudem liefert die implementierte krümmungsbasierte Segmentierung geeignete Merkmale zur Beschreibung der jeweiligen

Oberflächen, die eine anschließende Zuordnung erleichtern.

### 2.2 Berechnung der Mittleren Krümmung

Die durchgeführte Berechnung der Mittleren Krümmung basiert auf den Arbeiten von [BJ88]. Grundidee ist die Schätzung einer analytische Oberflächenbeschreibung in der lokalen Nachbarschaft eines Punktes, um so die partiellen Ableitungen zur Berechnung der Krümmung zu bestimmen. Dies wird durch Faltungsoperationen realisiert, die eine effektive Berechnung in verschiedenen Maßstäben ermöglichen. Zusammengefasst kann der Ansatz wie folgt beschrieben werden:

Innerhalb eines ungeraden  $N \times N$  Fenster seien Distanzpunkte an Positionen  $(u, v)$  aus der Menge  $U \times U$  mit  $U = \{-(N-1)/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, (N-1)/2\}$  gegeben. An diese Punkte soll eine lokale biquadratische Oberflächenbeschreibung basierend auf den diskreten orthogonalen Polynomen  $\mathcal{O}_0(u) = 1$ ,  $\mathcal{O}_1(u) = u$ ,  $\mathcal{O}_2(u) = (u^2 - M(M+1)/3)$  mit  $M = (N-1)/2$  angepasst werden. Mit

$$P_0(M) = N, \quad P_1(M) = \frac{2}{3}M^3 + M^2 + \frac{1}{3}M.$$

$$P_2(M) = \frac{8}{45}M^5 + \frac{4}{9}M^4 + \frac{2}{9}M^2 - \frac{1}{9}M^2$$

$$- \frac{1}{15}M$$

ergeben sich dann die normalisierten Versionen dieser orthogonalen Polynome  $\mathcal{O}_i(u)$  zu

$$\vec{d}_i(u) = \frac{\mathcal{O}_i(u)}{P_i(M)}$$

Durch die Kombination dieser normalisierten Polynome werden dann die zweidimensionalen Faltungskerne

$$[D_u] = \vec{d}_0 \vec{d}_1^T, \quad [D_v] = \vec{d}_1 \vec{d}_0^T,$$

$$[D_{uu}] = \vec{d}_0 \vec{d}_2^T, \quad [D_{vv}] = \vec{d}_2 \vec{d}_0^T, \quad [D_{uv}] = \vec{d}_1 \vec{d}_1^T$$

gebildet. Die partiellen Ableitungen der ver-  
 rauschten, quantisierten und diskreten Ver-

sion  $\tilde{g}(i, j)$  einer stückweise glatten Oberfläche ergeben sich dann durch die Faltungsoperationen

$$g_u(i, j) = D_u * g(i, j), \quad g_v(i, j) = D_v * g(i, j),$$

$$g_{uu}(i, j) = D_{uu} * g(i, j),$$

$$g_{vv}(i, j) = D_{vv} * g(i, j),$$

$$g_{uv}(i, j) = D_{uv} * g(i, j)$$

Diese partiellen Ableitungen werden dann zur Berechnung der Mittleren Krümmung genutzt.

$$H(i, j) = \frac{(1 + g_u^2(i, j)) + g_{uu}(i, j) + (1 + g_v^2(i, j)) + g_{vv}(i, j) - 2g_u(i, j)g_v(i, j)g_{uv}(i, j)}{2(\sqrt{1 + g_u^2(i, j) + g_v^2(i, j)})^3}$$

### 2.3 Analyse der Mittleren Krümmung

Die Eigenschaften der Mittleren Krümmung werden in Abb. 2 für unterschiedliche Objektbereiche von synthetischen Distanzbildern demonstriert. Die berechneten Krümmungswerte werden hierfür entlang der den Distanzbildern überlagerten roten Profillinie extrahiert. Aus der Analyse dieser Werte im unteren Teil der Abb. 2 folgt dass:

- Tiefensprünge (T), d. h. Diskontinuitäten der gemessenen Entfernungen an Verdeckungen ergeben klar sichtbare Nulldurchgänge mit sehr deutlichen Maxima beziehungsweise Minima der mittleren Krümmung.
- Diskontinuitäten der Flächennormalen an Objektkanten (K) führen zu flacheren Maxima. Konkave Kanten an Graten (K<sub>G</sub>) ergeben i ein positives Vorzeichen der Krümmungswerte, während konvexe Kanten an Falten (K<sub>F</sub>) zu negativen Werten führen.
- Die Mittlere Krümmung, die sich an gekrümmten Objektoberflächen (O<sub>K</sub>) ergibt ist im Vergleich zu den Werten an Kanten K<sub>G</sub> und K<sub>F</sub> deutlich geringer, wobei die Beträge der Mittleren Krümmung an Tiefensprünge T insgesamt am größten ist.

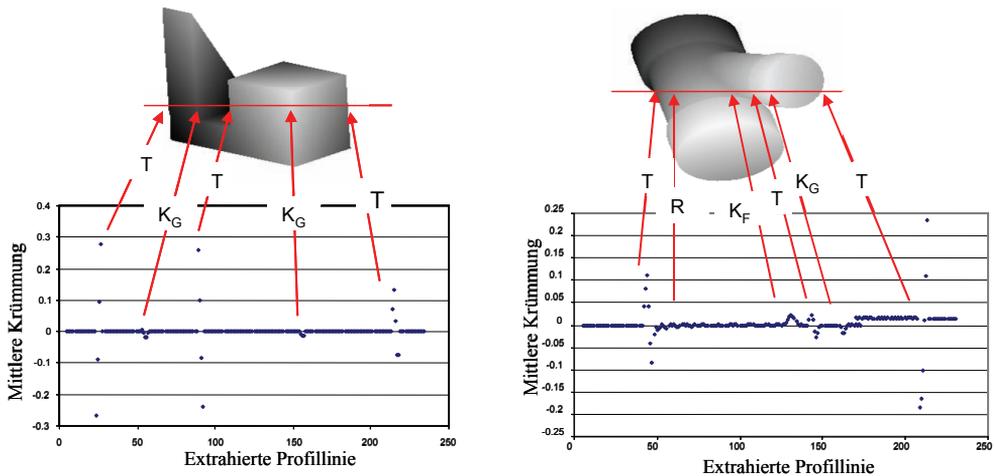
Durch die unterschiedlichen Beträge der Mittleren Krümmung ist eine Unterscheidung von Tiefensprünge beziehungsweise konvexen und konkaven Kanten durch ge-

eignete Schwellwerte einfach möglich. Dies wird in Abb. 3 anhand der unterschiedlichen Einfärbung der automatisch extrahierten Kantentypen dokumentiert.

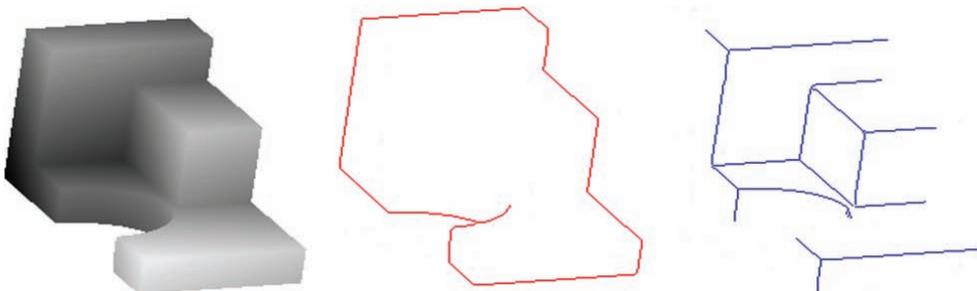
In Abb. 4 ist das Ergebnis der Segmentierung für zwei Distanzdatensätze des Khazne al-Firaun (Schatzhaus des Pharaos) in Petra, Jordanien dargestellt, die durch einen Mensi GS100 Laserscanner erfasst wurden [AH05]. Die obere Reihe von Abb. 4 zeigt die Fassade des Schatzhauses, während die untere Reihe den Eingang zu einem der inneren Räume zeigt. Zur krümmungsbasierten Segmentierung wurden die Abb. 4a dargestellten Distanzbilder genutzt, die extrahierten Kanten sind in der zweiten Spalte (Abb. 4b) dargestellt. Zur Extraktion markanter Kanten wurden zunächst relativ große Filtermasken genutzt, so dass sich ver-

schmierte Bereiche ergeben. Aus diesem Grund wurde eine Skelettierung als Postprozessierung eingesetzt, deren Ergebnis in den Abb. 4c dem Distanzbild überlagert wurde.

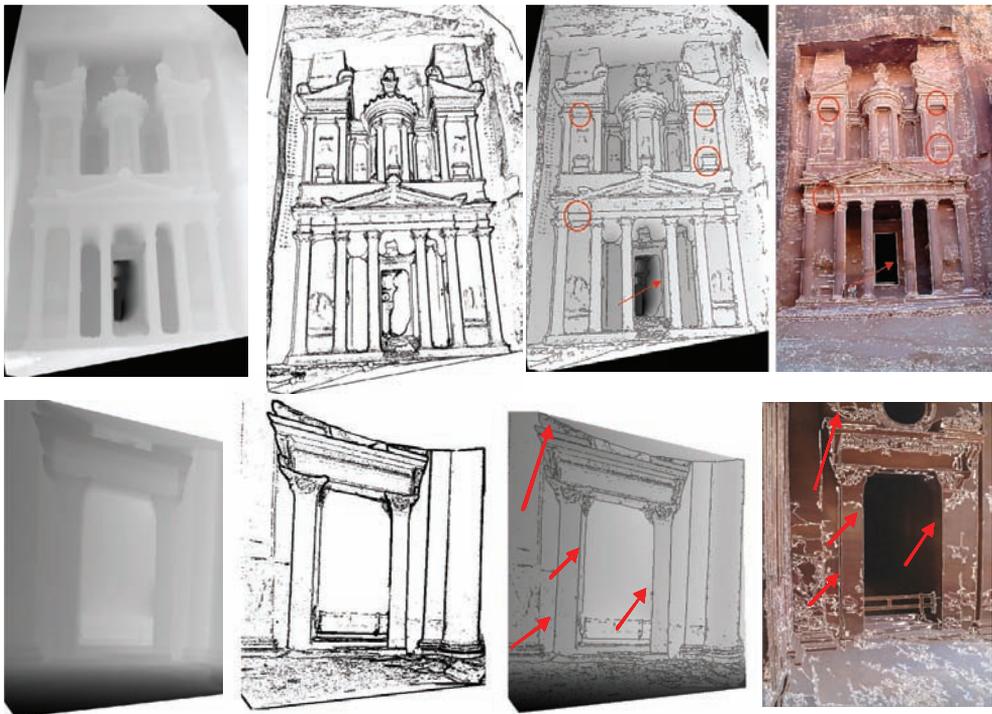
Wie Abb. 4d zeigt, ist die Anwendbarkeit des Segmentierungsalgorithmus nicht auf Distanzbilder beschränkt, sondern kann auch zur Extraktion geeigneter Merkmale aus Intensitätsbildern eingesetzt werden. In Abb. 4c und Abb. 4d sind zusätzlich korrespondierende Liniensegmente markiert, die manuell aus den Ergebnissen der Segmentierung ausgewählt wurden. Diese Korrespondenzen wurden anschließend zur Ko-registrierung der Farb- und Distanzbilder mittels des in [KF03] vorgestellten Verfahrens verwendet.



**Abb. 2:** Berechnete Mittlere Krümmungen für synthetische Datensätze.



**Abb. 3:** Segmentierung zur Trennung von Tiefensprüngen (rot) und Bruchkanten (blau).



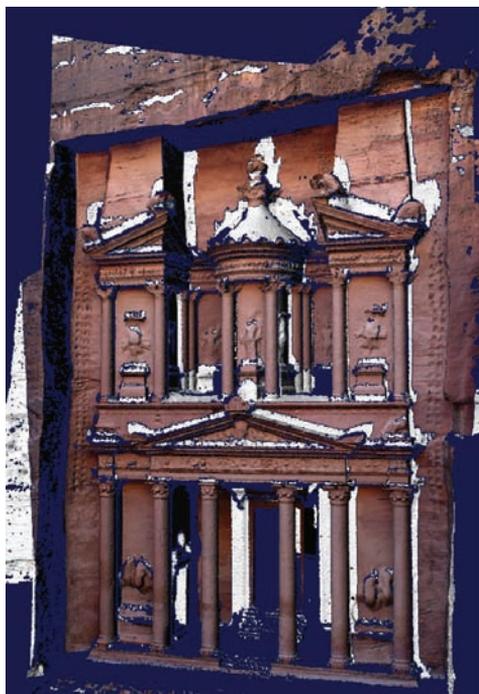
**Abb. 4:** a) Distanzbilder der Khazne al-Firaun, b) Segmentierte Bruchkanten im zugehörigen Distanzbild, c) Skelettierte Bruchkanten im zugehörigen Distanzbild, d) Segmentierung der Bilddaten. Für die Registrierung der Bild- und Distanzdaten ausgewählte Segmente sind durch Pfeile bzw. Kreise markiert.

### 3 Texturierung komplexer 3D Szenen

Nach der Registrierung der Bilder zu den erfassten LIDAR Daten ist eine Texturierung der Objektoberflächen einfach möglich. Hierfür ist anhand der bestimmten Transformationsparameter für jeden Objektpunkt die zugehörige Bildkoordinate des zur Texturierung verwendeten Bildes zu berechnen. Zusätzlich ist jedoch sicherzustellen, dass nur diejenigen Objektteile texturiert werden, die von den jeweiligen Aufnahme-standpunkten aus auch tatsächlich sichtbar sind. Während die hierfür notwendige Analyse von Verdeckungen für geometrisch einfache Objektbeschreibungen problemlos möglich ist, kann dies für komplexe Objekte wie historische Bauten sehr aufwändig werden. Zur Erfassung des 3D Modells der Khazne al-Firaun wurden beispielsweise Laserdaten

von drei verschiedenen Aufnahme-standpunkten aus aufgenommen. Dies resultierte nach der Vermaschung in einem 3D Modell mit durchschnittlichem Punktabstand von 5cm und mehr als 2 Millionen Dreiecken. Zur Texturierung müssen all die Knoten dieser Dreiecke in das zugehörige Bild transformiert und die Sichtbarkeit der jeweiligen Flächenelemente überprüft werden.

Die Analyse von Verdeckungen ist auch eine Standardaufgabe in der Computergaphik, so dass für deren Lösung sehr effiziente Ansätze zur Verfügung stehen. Während diese Verfahren ursprünglich zur Bestimmung von Sichtbarkeiten bei der Erzeugung virtueller Bilder aus gegebenen 3D Modellen entwickelt wurden, ermöglicht ihre Modifikation auch den Einsatz bei der Texturierung komplexer 3D Objekte. Ein typisches Verfahren zur Verdeckungsanalyse ist der Z-Buffer Ansatz. Dabei wird durch ei-



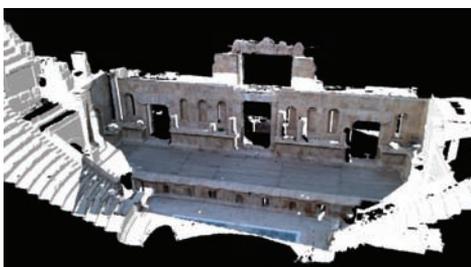
**Abb. 5:** Ergebnis der Texturierung mit grau markierten verdeckten Bereichen.

nen pixelweisen Vergleich von Tiefeninformation feststellt, welche Elemente einer Szene gezeichnet werden müssen und welche verdeckt sind. Dieser Ansatz wird von [GKK\*05] zur Sichtbarkeitsbestimmung in Texturbildern verwendet. [AH05] kombinieren diesen Ansatz mit dem in der 3D-Computergrafik ebenfalls bekannten Painter Algorithmus. Dieser sortiert zur Lösung des Sichtbarkeitsproblems alle Polygone ihrer Tiefe nach um sie bei der Darstellung der Reihenfolge nach zu überzeichnen. Durch die kombinierte Analyse im Bild- und Objektraum wird somit eine effektive Berechnung der Verdeckungen in den Texturbildern ermöglicht.

Ein Zwischenergebnis des Verfahrens ist in Abb. 5 für das vermaschte Modell der Khazne al-Firaun dargestellt, wobei das in Abb. 4d dargestellte Bild für die Texturierung verwendet wurde. Die in diesem Bild nicht sichtbaren Maschen des Objektmodells werden bestimmt und in Abb. 5 als graue Re-



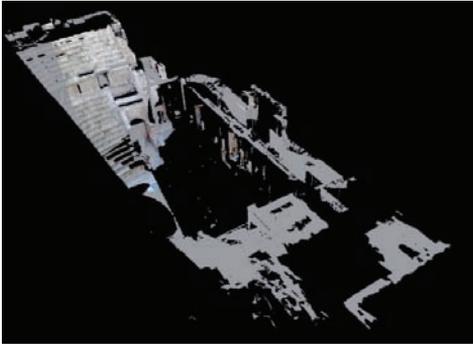
**Abb. 6:** Zur Texturierung verwendete Aufnahme des Römischen Theaters.



**Abb. 7:** 3D Modell mit texturiertem und verdeckten Bereichen.

gionen markiert. Diese Bereiche werden aus der ursprünglichen Vermaschung des 3D Modells extrahiert um sie anschließend durch ein zweites Bild von einem anderen Aufnahmestandpunkt aus zu texturieren. Dieser Prozess der Sichtbarkeitsanalyse und Extraktion verdeckter Bereiche wird anschließend so lange wiederholt, bis das komplette Modell anhand aller verfügbaren Bilder texturiert ist. In einem letzten Schritt werden dann die getrennten Bereiche wieder zu einem Gesamtobjekt zusammengefügt.

Dieses iterative Verfahren wurde auch zur Prozessierung eines Datensatzes des Römischen Theaters in Jerash, Jordanien eingesetzt. Im Rahmen dieses Projektes wurden zunächst zur geometrischen Rekonstruktion LIDAR Daten von 6 Standpunkten aus mit einem Mensi GS100 Scanner erfasst. Das daraus abgeleitete 3D Modell besteht aus 6 Millionen Dreiecken. Zunächst wird das in Abb. 6 dargestellte Bild zur Texturierung verwendet, das Ergebnis zeigt Abb. 7.



**Abb. 8:** Extrahierte Bereiche nach Texturierung durch zweites Bild.



**Abb. 9:** Zweites Texturbild.



**Abb. 10:** Ausschnitte des mit weiteren Bildern texturierten Modells.



**Abb. 11:** Ergebnis der Texturierung nach Zusammenfügung der Teilbereiche.

Analog zur Darstellung in Abb. 5 sind dabei die im Bild verdeckten Bereiche des 3D Modells grau eingefärbt.

Abb. 8 zeigt diese Bereiche getrennt vom ursprünglichen 3D Modell. Diese Maschen werden wiederum mit dem in Abb. 9 enthaltenen Bild texturiert, das Ergebnis dieses Prozesses ist bereits in Abb. 8 enthalten.

Die danach verbleibenden grau markierten Bereiche werden dann mit weiteren verfügbaren Bildern texturiert, beispielhafte Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt.

Neben der geometrischen Prozessierung ist in der Regel auch eine radiometrische Bearbeitung der Texturbilder notwendig. Hierfür wurde ein kommerzielles Bildverarbeitungs paket zur Histogrammanpassung und Bildmosaikierung genutzt. Dadurch ist die Minimierung eventueller Differenzen zwischen den zur Texturierung verwendeten Bildern möglich. Wie Abb. 11 anhand eines Ausschnitts des endgültigen 3D Modells zeigt, werden so nach dem abschließenden wieder Zusammenfügen homogene Schnittlinien zwischen den mit unterschiedlichen Bildern texturierten Teilbereichen erreicht.

#### 4 Zusammenfassung

Realistische Visualisierungen komplexer Szenen, wie sie beispielsweise zur Dokumentation von Kulturdenkmälern und historischen Bauten erstellt werden, erfordern eine Texturierung der erfassten 3D Modelle mittels qualitativ hochwertiger Bilder. Dies kann durch eine Kombination von LIDAR Daten mit getrennt erfassten Bildern ermöglicht werden. Während mit dem vorgestellten Verfahren der Einsatz der registrierten Datensätze derzeit auf die Texturierung beschränkt ist, sollen zukünftige Arbeiten eine Integration auch zur effektiveren 3D Datenerfassung und geometrischen Modellierung nutzen.

#### Literatur

- [AH05] ALSHAWABKEH, Y. & HAALA, N., 2005: Automatic Multi-Image Photo Texturing of Complex 3D Scenes. – CIPA IAPRS, Vol. 34-5/C34: 68–73.
- [A06] ALSHAWABKEH, Y., 2006: Integration of Laser Scanning and Photogrammetry for Heritage Documentation. – Dissertation Universität Stuttgart.
- [BJ88] BESL, P. & JAIN, R., 1998: Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9(2): 167–192.
- [BM92] BESL, P.J. & MCKAY, N., 1992: A method for Registration of 3-D Shapes. – IEEE Trans. on Pattern Anal. & Machine Intell. 14[2]: 239–256.
- [CH96] CHRISTY, S. & HORAUD, R., 1996: Iterative Pose Computation from Line Correspondences. – Computer Vision and Image Understanding, Vol. 73, No. 1: 137–144.
- [GKK\*05] GRAMMATIKOPOULOS, L., KALISPERAKIS, I., KARRAS, G. & PETSAS, E., 2005: Data Fusion from Multiple Sources for the production of Orthographic and Perspective Views with Automatic Visibility Checking. – CIPA IAPRS Vol. 34-5/C34.
- [HJJ\*96] HOOVER, A., JEAN-BAPTISTE, G., JIANG, X., FLYNN, P. & BUNKE, H., 1996: An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(7): 673–689.
- [KF03] KLINEC, D. & FRITSCH, D., 2003: Towards pedestrian navigation and orientation. – Proceedings of the 7th South East Asian Survey Congress: SEASC'03, Hong Kong.
- [LH02] LEE, Y. & HABIB, A., 2002: Pose Estimation of Line Cameras Using Linear Features. – ISPRS Symposium of PCV'02 Photogrammetric Computer Vision, Graz, Austria.
- [LHS00] LENSCH, H., HEIDRICH, W. & SEIDEL, H., 2000: Automated texture registration and stitching for real world models. – Proceedings of Pacific Graphics, pp. 317–326.
- [LS05] LIU, L. & STAMOS, S., 2005: Automatic 3D to 2D registration for the photorealistic rendering of urban scenes. – Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society.
- [MLM01] MARSHALL, D., LUKACS, G. & MARTIN, R., 2001: Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy. – IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 23(3): 304–314.
- [SD01] SAPPA, A. & DEVY, M., 2001: Fast Range Image Segmentation by an Edge Detection Strategy. – Proc. IEEE Conf. 3D Digital Imaging and Modelling, (2001), pp. 292–299.

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. YAHYA ALSHAWABKEH  
e-mail: yahya.alshawabkeh@ifp.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. NORBERT HAALA  
e-mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. DIETER FRITSCH  
e-mail: dieter.fritsch@ifp.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Photogrammetrie (ifp)  
Geschwister-Scholl-Straße 24D  
D-70174 Stuttgart

Manuskript eingereicht: Januar 2007

Angenommen: Januar 2007