

# DATENAKQUISITION FÜR DIE 3D-REKONSTRUKTION MIT TIEFENKAMERA UND DCC UNTER ANWENDUNG VON SOFTWAREWERKZEUGEN FÜR DEN 3D-DRUCK

Günter Pomaska

FH Bielefeld, FB Architektur und Bauingenieurwesen, Artilleriestraße 9, 32427 Minden –  
gp@imagefact.de

**KEY WORDS:** 3D-Rekonstruktion, Tiefenkamera, Structure from Motion, Mesh Prozessierung, 3D-Druck

## ABSTRACT:

3D object reconstruction is important for analysis, documentation and manufacturing of replica in numerous fields of applications. With RGB depth cameras and digital compact cameras sensor technology is generally available. This equally applies as well to software tools for recording, modeling and presentation of valuable items. This contribution introduces the technology applied to museal collection objects and depicts possibilities of 3D printer driver software.

## KURZZUSAMMENFASSUNG:

3D-Objektrekonstruktionen haben bei der Analyse, Dokumentation und Erstellung von Replika in vielen Anwendungsfeldern Bedeutung erlangt. Mit RGB-D Tiefenkameras und Digitalen Kompaktkameras sind Aufnahmesensoren allgemein zugänglich. Das gilt auch für die entsprechenden Softwarewerkzeuge zur Datenerfassung, Modellierung und Präsentation. Der Beitrag beschreibt den Einsatz der Technologie in der Anwendung bei musealen Projekten und verweist auf die Einsatzmöglichkeiten von Software zur 3D-Druckersteuerung.

## 1. EINLEITUNG

Die ersten 3D-Drucker für den Heimbereich waren als Bausätze konzipiert. Mit dem Aufkommen von Fertiggeräten für Hobbyanwender (z.B. Makerbot) kann man den Einsatz und die Bedienung der 3D-Drucker mit denen früherer Laserdrucker vergleichen. Damit einher erreichten gleichzeitig Scanner für den Nahbereich hohe Popularität. War es anfangs der Hype um die Kinect, ein Sensor ursprünglich entwickelt zur Gestensteuerung für Spieleanwendungen, so sind daraus heute Scanner geworden, die den spielerischen Ansatz herausstellen und in Echtzeit 3D-Modelle liefern. Als Beispiel für derartige Geräte sei auf den Scanner Sense 3D von Cubify verwiesen. Auch die Apps für Smartphones bewegen sich auf dieser Schiene. PrimeSense, der führende Hersteller von Tiefenkameras, gibt auf seiner Webseite an, derzeit in ca. 20 Millionen Haushalten präsent zu sein. Wir haben uns hier mit den Prinzipien der Tiefenkameras und einem photogrammetrischen Verfahren, der Structure from Motion Datengewinnung auseinanderzusetzen. Ein weiterer Blick liegt auf der Nutzung von Softwarewerkzeugen für die Druckvorbereitung. Anwendungen aus der Denkmalpflege zeigen die Möglichkeiten der Technologien auf, belegen aber auch, dass ein wasserdichtes 3D-Modell in aller Regel nicht auf einfachen Tastendruck zu haben ist.

## 2. SCANNEN MIT RGB-D KAMERAS

Einsatzkriterien einer Scanner-Technologie hängen von vielen Faktoren ab. Messvolumen, Genauigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Verhalten des Objekts sind von Bedeutung. Während Laserscanning mit einer Reichweite von bis zu einigen hundert Metern mit einer Genauigkeit unterhalb eines Zentimeters angegeben werden kann, können Verfahren mit strukturiertem Licht Genauigkeiten

im Mikrometerbereich erzielen, sind aber im Messvolumen auf wenige Meter eingeschränkt.

Die Komponenten der von PrimeSense entwickelten Technologie sind ein Infrarotsensor, eine Infrarotkamera und eine RGB-Kamera. Audiokomponenten werden hier nicht betrachtet. Der synchronisierte Ausgabestream von Tiefe und Farbinformation wird in die räumlichen Informationen umgesetzt. Der IR-Projektor sendet im nahen Infrarotbereich ein für das menschliche Auge nicht sichtbares codiertes Punktmuster aus. Ein CMOS-Sensor empfängt das von der Szene reflektierte Bild und berechnet, aufgrund des Kameraabstandes über die Parallaxen korrespondierender Punkte, die Tiefenmatrix mit VGA-Auflösung, der ein RGB-Bild zugeordnet werden kann. Die Berechnungen erfolgen mit parallelen Algorithmen auf einem Chip in der PrimeSense SoC Technologie, wodurch der Hostrechner erheblich entlastet ist.

Das Messvolumen für die PrimeSense Carmine 1.08 wird mit 0,8 bis 3,5 m angegeben, die mittlere Tiefenauflösung beträgt 1,2 cm bei 30 fps. Die Carmine 1.09, für den Nahbereich zwischen 0,35 und 1,4 m konzipiert, wird mit einer mittleren Tiefenauflösung von 0,5 cm angegeben.

Mit Capri hat PrimeSense aber bereits die nächste Generation der Technologie angekündigt. Im Unterschied zur kompakteren PrimeSense und Asus benötigt die Microsoft Kinect für Windows eine eigene Stromversorgung und kann softwaregesteuert geneigt werden. Aber auch hier ist bereits von der Kinect 2 die Rede. Mit dem Open-NI SDK ([www.openni.org](http://www.openni.org)) steht den Entwicklern Software für Linux, Windows und OSX zur Verfügung, Microsoft unterstützt das Windows SDK.

Anwendungssoftware zum 3D-Scannen ist in Varianten als free oder paid aus dem Internet zu beziehen. Derzeit

sind u.a. ReconstructMe, Skanect, Scenect von Faro, Brekel Kinect, Kinect Fusion, K3DScan oder Artec Studio für Kinect zu nennen. Beste Hardwarevoraussetzungen sind 64bit Rechner, 8MByte RAM, Cuda 2.0 kompatible Grafikkarten für Berechnungen auf der GPU unter Windows ab Version 7.



Abbildung 1. Aufnahme vor Ort mit Notebook und Kinect

Abbildung 1 zeigt eine mit einer Infrarotkamera aufgenommene Aufnahmeanordnung mit Notebook und Kinect. Das (für das menschliche Auge nicht sichtbare) Punktmuster wird vom Infrarotsender auf das Objekt projiziert, von der Infrarotkamera empfangen und zu einer Oberflächenmaske in Echtzeit verknüpft. RGB-Informationen werden zusätzlich registriert. Die Tiefenberechnung erfolgt offenbar aufgrund von Parallaxen des Referenzmusters. Bei Kamerabewegung wird simultan ein Matching mit der bereits vorhandenen Geometrie vorgenommen und so das vollständige 3D-Modell in Echtzeit erstellt. Die gleichmäßige Kamerabewegung, hier auf dem Feldtisch, ist hilfreich bei der Echtzeitbestimmung.

Eine weitere Aufnahmeanordnung zeigt die Abbildung 2. Zur Erzeugung einer gleichmäßigen Kamerabewegung wird eine Kamerastabilisierung (steady cam) benutzt. Dabei wird das Kamerabild dem Bediener auf einem Smartphone angezeigt. Die Anwendungssoftware läuft weiterhin auf dem Notebook. Virtual Network Computing, kurz VNC, ist eine Software, die den Bildschirminhalt eines entfernten Rechners (Server) auf einem lokalen Rechner (Client) anzeigt und im Gegenzug Tastatur- und Mausbewegungen des lokalen Rechners an den entfernten Rechner sendet. Damit kann man auf einem entfernten Rechner arbeiten, als säße man direkt davor. Im vorliegenden Fall ist UltraVNC auf dem Notebook installiert. Auf dem Smartphone wird der mobile WLAN-Hotspot über Einstellungen > Weitere Einstellungen > Tethering und mobiler Hotspot aktiviert. Auf dem Notebook erfolgt danach mit dem Drahtlosnetzwerk AndroidAP die Verbindung der Rechner. Über die Konsole erhält man mittels des Befehls ipconfig die Ipv4-Adresse z.B. 192.168.43.202 angezeigt. Diese IP benötigen Sie für den VNC-Client auf dem Smartphone. Die Kamerahalterung mit Smartphone ist ein Prototyp in der Erprobungsphase.



Abbildung 2. Prototyp Kamerahalterung mit Smartphone

### 3. STRUCTURE FROM MOTION

Structure from Motion SFM ist ein Begriff aus dem Bereich Computer Vision und bezeichnet einen automatischen Prozess, der die räumliche Struktur von Objekten aufgrund korrespondierender Merkmale in Bildern erkennt. In der Photogrammetrie wird die Vorgehensweise als Mehrbild-Photogrammetrie benannt. Grundlage des Verfahrens ist Bundler, eine an der Universität Washington zur Rekonstruktion ungeordneter Bildsequenzen mit beliebig beteiligten Kamerasystemen entwickelte Software. Eingangsdaten für Bundler sind digitale Bilder, Bildmerkmale und Bildzuordnungen. Rekonstruiert wird die Kamera- und Szenengeometrie. Bundler ist Open-Source-Software für Linux und Windows.

Bundler baut zunächst eine Bildliste mit Näherungswerten der Kameradaten aus den EXIF-Bildinformationen auf. Im nächsten Schritt werden Merkmale in den Bildern ermittelt, häufig findet der SIFT-Detektor Anwendung. Der Algorithmus (scale invariant keypoint detector) wurde 1999 von Loewe an der University British Columbia entwickelt. Das Matching der so gefundenen Merkmalspunkte kann mit dem RANSAC-Algorithmus erfolgen. Kameraparameter, Photopositionen und Objektpunkte werden nach der Methode der kleinsten Quadrate in einem Ausgleichsprozess bestimmt. Bundler hat mit Patch-based Multi-View Stereo PMVS und CMVS Clustering-Views for Multi-View Stereo Software von Yasutaka Furukawa, Univ. Washington, zwei wesentliche Erweiterungen erfahren. CMVS ist ein Preprozessor für PMVS zur Kachelung großer Bilddaten und PMVS verdichtet die Punktwolke. Es existieren unterschiedliche Distributionen der SFM-Software. Sehr komfortabel ist VSFM Visual Structure from Motion von Changchang WU, Univ. Washington. Die Software kann von der Webadresse <http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/index.html> heruntergeladen werden.

Neben den Desktoplösungen werden für das SFM-Verfahren auch Webservices angeboten. Nach Hochladen der Bilder erhält man das 3D-Objekt als Mesh zurück. Bekannte Lösungen sind Cubify Capture oder Autodesk ReCap Photo. Ebenfalls ist das Verfahren als App für Smartphones verfügbar.



Abbildung 3. Artefakt auf einem Drehteller positioniert

Das Prinzip des photogrammetrischen Verfahrens verlangt i.d.R. eine Basis (motion) zwischen zwei Kamerapositionen. Bei kleinen Objekten kann man aber auch das Objekt bei fester Kamera rotieren. Es muss aber in jedem Fall eine Trennung zwischen rotationsinvarianten Objekten und dem Objekt selbst erfolgen. Hinzu kommt, dass ein Objekt auch in mehreren Positionen z.B. kopfüber aufzunehmen ist. Die Einrichtung mit einem Lichtzelt und dem Miniaturobjekt auf einem Drehteller ist der Abbildung 3 zu entnehmen. Es handelt sich hier um ein Spielzeugpferdchen, das bei Ausgrabungen in der Stadt Minden gefunden wurde und auf ein Alter von ca. 1100 Jahren datiert ist. Die Herausforderung an die Photogrammetrie war dabei die geringe Größe des Objekts mit dem Einsatz von Zwischenringen. In der Abbildung 4 ist die Orientierungsberechnung mit VSFM dargestellt. Das texturierte 3D-Oberflächenmodell besteht aus etwa 100.000 Dreiecken.

Die Wahl zwischen Scannen mit der Tiefenkamera und dem Structure from Motion Verfahren wird durch die Oberflächenbeschaffenheit des zu scannenden Objekts entschieden. Oberflächen, die hinreichend Textur aufweisen sind für das photogrammetrische Verfahren geeignet. Ist eine Oberflächentextur nicht vorhanden, wird man eine RGB-D Kamera einsetzen müssen. Sofern man Oberflächen mit Talkum, Mattspray oder vergleichbaren Substanzen präparieren darf, sind auch Materialien wie etwa Glas kein Problem bei der 3D-Objektrekonstruktion.

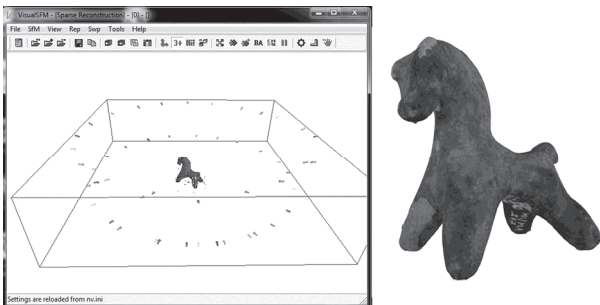


Abbildung 4. 3D-Rekonstruktion mit VSFM und texturiertes Oberflächenmodell

#### 4. MESH PROCESSING

Aus der Punktwolke ist nunmehr eine Oberfläche zu konstruieren. Die Standardsoftware für diese Aufgabe ist MeshLab. Die Software basiert auf der VCG Bibliothek des Visual Computing Lab ISTI-CNR und wurde an der Universität Pisa, Abteilung Computer Science entwickelt.

Mit Mesh bezeichnet man in der Computergrafik ein Polygonnetz zur geometrischen Beschreibung von Oberflächen. Das Ergebnis eines Scans kann als Knotenliste oder vermashtes Dreiecksnetz in MeshLab importiert werden. Meshlab unterscheidet zwei Arten von Layern: Mesh-Layer und Raster-Layer. Mesh-Layer sind der Geometrie zugeordnet. Raster-Layer sind 2D-Texturen, die mit Kameradaten assoziiert werden. Vom Scan zur Mesh sind folgende Arbeitsschritte auszuführen: Bereinigung der Punktwolke, Registrierung der Scans, Surface Reconstruction, Reduktion und Glättung und Finishing. Es ist an dieser Stelle nicht angezeigt, den komplexen Modellierungsvorgang zu beschreiben. Hier wird nur der Weg vom Scan zur Mesh mit den Befehlsfolgen in Meshlab skizziert. Ausgehend von der eingefärbten Punktwolke wird mit *Filters > Sampling > Poisson disk Sampling* die Anzahl der Samples reduziert. Ein neuer Layer mit dem Label Poission disk Samples wird angelegt, die Zahl der Punkte ist entsprechend der Vorgabe reduziert. Im zweiten Schritt werden mit *Filters > Normals, Curvature and Orientation > Compute Normals for Point Sets* die Normalenvektoren berechnet. Danach kann die Mesh konstruiert werden: *Filters > Remeshing, Simplification and Reconstructing > Surface Reconstruction: Poisson*. Mit Octree Depth 9 und Solver divide 7 erreicht man ein gutes Ergebnis. Ggf. möchten Sie die Mesh noch weiter reduzieren, glätten oder Farbwerte übertragen. Details zur Arbeit mit Meshlab findet man u.a. auch auf den YouTube-Kanälen.

#### 5. 3D-PRINTER WERKZEUGE

Ein 3D-Objekt kann nur auf einem 3D-Printer ausgegeben werden, wenn das Modell *wasserdicht* ist und keine Löcher aufweist. Die Vorbereitung des Druckprozesses besteht in der Fehlerbereinigung, Reduzierung der Modellflächen, dem Zuschnitt des Modells, der Skalierung und Positionierung auf der Druckfläche. Die bereinigte STL-Datei wird als G-Code an den Drucker gesendet. Unabhängig von einer beabsichtigten Druckerausgabe ist die Druckvorbereitung des Modells ein wichtiges Glied in der Verarbeitungskette.

Entsprechend des Materials kommt beim 3D-Druck der Ausbildung des Objekts erhebliche Bedeutung zu. Wir denken hier nicht an den Hobbydruck mit Kunststoffäden, sondern an professionellen Pulverdruck. Es werden Bedingungen an die Wandstärke des Objekts gestellt, d. h. die Miniaturen müssen ausgehöhlt werden und ggf. Öffnungen zum Entfernen des nicht benutzten Pulvers haben. Ausgedehnte Flächen müssen ggf. gestützt werden. Bewegliche Teile benötigen einen Mindestabstand oder auch die Kantenausbildung muss dem Material entsprechen. Zwei der gängigen Programme zur Druckvorbereitung sind Netfabb und Meshmixer.

Meshmixer von Autodesk ist als Freeware erhältlich, Netfabb hat unterschiedliche Lizenzmodelle. Zu den Funktionen der Software gehören die Vereinigung von Maschen, die Erstellung von Festkörpern aus Reliefs bzw. Oberflächen, die Fehlerbeseitigung im Modell sowie Funktionen zum organischen Modellieren. Ein importiertes Modell wird zunächst auf Fehler analysiert und durch Klick auf angezeigte Unzulänglichkeiten bereinigt. Das bereinigte Modell kann skaliert werden und wird als STL-File exportiert.

Eine wichtige Funktion ist auch das Slicing. Mit Schnittfunktionen können größere Modelle unterteilt werden und Profile sind zu erzeugen. Ein Screenshot der Korrekturfunktionen von Meshmixer ist in Abbildung 5 zu sehen. Unzulänglichkeiten im Modell werden angezeigt und können automatisch korrigiert werden. Daneben ist das fertige 3D-Modell einer Grabplatte, das zum 3D-Druck aufbereitet wurde, abgebildet.

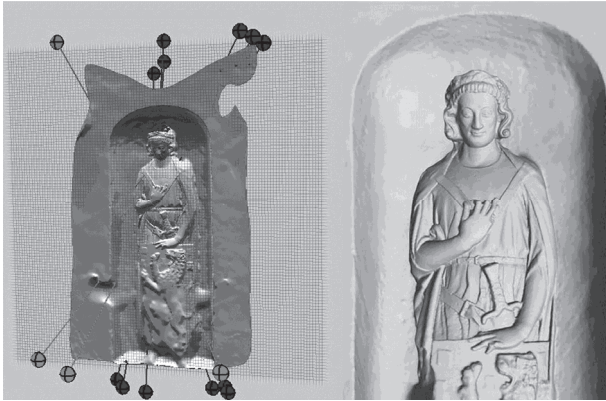


Abbildung 5. Korrekturfunktionen von Meshmixer und aufbereitetes 3D-Modell

## 6. LITERATUR

Singh, S., 2010. *Beginning Google SketchUp for 3D Printing*. Apress, ISBN 9781430233619

Hausman, K. K. & Horne, R., 2014. *3D Printing for Dummies*. Wiley& Sons, ISBN: 978-1-118-66075-1

Pomaska, G., 2013 Monitoring the Deterioration of Stone at Mindener's Museum Lapidarium. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2. XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg, France

Weitere Quellverweise auf <http://www.scanner.imagefact.de>