

Vom 3D-Objekt zur 3D-Kopie

—

Mobiles Aufmaß einer Bronzeplastik unter Einsatz eines handgeführten 3D-Scanners am 3D-Gelenkmessarm

Martin Linscheid** und Martin Schlüter*

*i3mainz, Holzstrasse 36, 55116 Mainz, Germany,

Mainz Univ. of Applied Sciences, [schlueter@geoinform.fh-mainz.de](mailto:schluter@geoinform.fh-mainz.de)

**scannTec GmbH & Co. KG, Luise-Vollmar-Strasse 19, 41065 Mönchengladbach

ZUSAMMENFASSUNG

Die präzise Erfassung räumlicher Objekte mittels 3D-Scanning zielt heute verstärkt auf die automatisierte Generierung von 3D-Kopien mittels Rapid Prototyping Technologien und nicht mehr allein auf eine virtuelle 3D-Visualisierung am PC. Damit gewinnt die möglichst lückenlose Erfassung geschlossener Oberflächen an Bedeutung. Handgeführte 3D-Scanner weisen im Hinblick auf die Erfassung geschlossener Oberflächen Vorzüge auf, exemplarisch kommt hier ein *3dscanners Modelmaker* an einem *Faro* 3D-Gelenkmessarm zum Einsatz. Am Beispiel der Bronzeplastik „Der Daumen“ von César Baldaccini (1921-1998) wird der vollständige Workflow von der Digitalisierung bis zur 3D-Kopie dargestellt und diskutiert.

Stichworte: 3D-Scanning, 3D-Gelenkmessarm, Mobile 3D-Koordinatenmesstechnik, , Rapid Prototyping 3D-Plotting, 3D-Kopie, Baldaccini

1. EINFÜHRUNG

Daumen hoch: Der Kunsthistoriker Dr. Klaus-D. Pohl, Kustos am Landesmuseum Darmstadt, wähnt schon heute, dass „irgendwann, aus weiter Ferne, in kunstgeschichtlicher Betrachtung des Werks von César Baldaccini immer ein großer Daumen auftauchen wird“ [HENSEL 2004]. Die Bronzeplastik „Der Daumen“, welche derzeit als Leihgabe des Landesmuseums im Foyer des Regierungspräsidiums steht, dient hier als Beispielobjekt für die Demonstration und Diskussion der mobilen 3D-Erfassung von Kunstobjekten mit metallischer Oberfläche bzw. mit entsprechenden Reflexionseigenschaften.

2. PROS UND CONS HANDGEFÜHRTER 3D-SCANNER

Es hat sich eingebürgert, 3D-Scanner zunächst nach ihrem Messprinzip einzuordnen. In der Regel werden Ranging- und Triangulations-Laserscanner sowie Projektionsscanner (z.B. „Streifenprojektion“) unterschieden [BÖHLER UND MARBS 2004]. Für extrem kurze Abstände zwischen Objekt und Scansensor bieten Triangulations-Laserscanner Genauigkeits- und Auflösungs Vorteile. Es liegt nahe, einen solchen Triangulations-Laserscanner mit einem zweiten Mess-

system zu kombinieren, welches kontinuierlich Lage und Ausrichtung des Triangulations-Laserscanners im Raum erfasst. Damit erhält man ein Gesamtsystem, mit dem auch ausgedehnte Messvolumina einem hochgenauen und hochaufgelösten 3D-Scanning unterzogen werden können. Für das kontinuierliche Tracking von Lage und Ausrichtung eines Scankopfs werden primär *stationäre* Koordinatenmessgeräte (KMGe) eingesetzt. Für den *mobilen* Einsatz taugen dagegen mechanische Lösungen wie 3D-Gelenkmessarme, optische Lösungen auf der Basis des stereophotogrammetrischen Trackings sowie Sonderlösungen unter Einbeziehung der interferometrischen Distanzmessung, vgl. [SCHLÜTER 2002]. Bei allen mobilen Lösungen wird der 3D-Scankopf per Hand geführt – extrem flexibel, aber eben auch nicht vollautomatisierbar wie bei stationären Systemen. Für die Trackingsysteme sind Arbeitsradien von wenigen Dezimetern bis zu wenigen Metern typisch, wobei Gesamtgenauigkeiten im Submillimeterbereich ermöglicht werden. Zahlreiche Systeme unterstützen ein Umpositionieren des Trackingsystems für die Erfassung größerer Objekte, ein gemeinsames geometrisches Referenzsystem wird dabei üblicherweise durch geeignete Verknüpfungspunkte hergestellt.

Im Folgenden konzentrieren wir uns exemplarisch auf einen 3D-Gelenkmessarm als Trackingsystem eines Laser-Triangulationsscanners, wie er derzeit am Institut für raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz verfügbar ist, vgl. Abb. 1.



Abb. 1: Mobiler Einsatz eines 3D-Gelenkmessarms des Herstellers *Faro* im Rahmen einer technischen Messung, aus [DÜRMUTH 2005].

Die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu 3D-Scannern mit größerem Arbeitsabstand sind offenkundig:

- ⊗ Für die gesamte Scandauer muss ein stabiler und sicherer Stand gewährleistet sein. Im Vergleich zu Scansystemen, welche nur wenige Sekunden oder Minuten auf einem Standpunkt arbeiten, ist hier oft ein erheblich größerer Aufwand erforderlich. Flexibilität gewinnen wir durch die Möglichkeiten zur Montage des Messarms auf verfahrbaren Industriestativen (ursprünglich für Präzisionstheodolite ausgelegt) sowie über Fixierungen mittels Schalmagneten oder mechanischer Klemmen. Die stabile Aufstellung des Gelenkmessarms ist aber stets durch das Anmessen von Kontrollpunkten vor und nach der eigentlichen Messung zu kontrollieren. Beim 3D-Gelenkmessarm ist dies sehr zügig durch antastende Messungen realisierbar, als Kontrollpunkte verkleben wir in der Regel kleine Aluminiumplättchen mit Kegelbohrung.
- ⊗ Eine Systemkalibrierung bzw. Vor-Ort-Überprüfung muss alle beteiligten Komponenten (in der Regel zwei oder sogar noch mehr Messsysteme) mit einschließen. Man gewinnt aber vielfach auch durch die ergänzende Option zur antastenden 3D-Koordinatenmessung, und zwar nicht nur beim 3D-Gelenkmessarm, sondern auch bei den optisch trackenden Systemen!
- ⊗ Die Ausrichtung des Scankopfs kann sich an den Anforderungen der zu scannenden Oberfläche orientieren. Man gewinnt dadurch zweierlei: Zum einen ist es einfacher, auch bei komplexen Objekten die Sichtbarkeit der *gesamten* Oberfläche herzustellen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Erstellung von 3D-Kopien mit Rapid Prototyping Techniken von zunehmender Bedeutung, da diese Techniken stets geschlossene („wasserdichte“) Ergebnisflächen einfordern. Zum zweiten vergrößern sich die Spielräume beim Scannen von Oberflächen mit schwierigen Reflexionseigenschaften, z.B. wenn der Anteil spiegelnder Reflexion im Vergleich zum Anteil diffuser (Lambert -) Reflexion hoch ist. Da derlei Reflexionscharakteristika vielfach richtungsabhängig sind, kann allein durch die Flexibilität in der Ausrichtung der Blickrichtung des Scankopfs auch für schwierige – z.B. metallische – Oberflächen ein gutes und flächendeckendes Gesamtergebnis erzielt werden.

Insgesamt gesehen lassen sich handgeführte, hybride 3D-Scansysteme im Vergleich zu 3D-Scannern mit größerem Arbeitsabstand nicht pauschal als „besser“ oder „schlechter“ beurteilen. Vielmehr ist je nach Aufgabenstellung stets der jeweils am besten geeignete Scannertyp auszuwählen. Aus den Erfahrungen am i3mainz – hier sind seit etwa 2002/2003 sowohl ein Streifenprojektionsscanner *GOM ATOS II*, vgl. [BERNER ET AL. 2004]), als auch das im Folgenden diskutierte System *3dscanners Modelmaker X70* am 7-achsigen 3D-Gelenkmessarm *Faro Titanium* (vgl. Abb. 2) verfügbar – lässt sich ablesen: Jede Anwendung hat „ihren“ 3D-Scanner.



Abb. 2: 3dscanners Modelmaker X70 am 3D-Gelenkmessarm Faro Titanium.

3. „DER DAUMEN“: VOM 3D-SCAN ZU VISUALISIERUNG UND REPRODUKTION

Die Problematik der zunächst virtuellen 3D-Rekonstruktion der Plastik „Der Daumen“ liegt in den Materialeigenschaften (Bronze, teilweise spiegelnder Charakter) sowie ferner in den zahlreichen Feinstrukturen (ausgeprägte Rillenstrukturen insbesondere an der Daumenvorderseite), vgl. Abb. 3.

Um alle Scanaufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren werden auf dem Sockel Datumspunkte angebracht. Zum Zeitpunkt der Messung stehen zwölf Datumspunkte zur Verfügung. Nach Absprache mit dem Hessischen Landesmuseum Darmstadt können keine Tastmarken auf dem Daumen selbst angebracht werden, da zur Befestigung doppelseitiges Klebeband verwendet wird. Beim späteren Entfernen könnte der Bronzebezug der Plastik beschädigt werden. Somit muss auf eine komplette Umschließung des Daumens mit Passpunkten verzichtet werden. Alle Datumspunkte werden auf dem Granitsockel befestigt. Acht auf den äußeren Rand und vier Punkte auf dem Sockel in der Nähe der Plastik. Die Punktverteilung wird so gewählt, dass von jedem Standpunkt des Gelenkmessarms mindestens fünf Datumspunkte erreicht werden können.



Abb. 3: „Der Daumen“ an seinem aktuellen Standort im Regierungspräsidium Darmstadt.

Es wird ein relativ feines Punktraster von 0,5mm x 0,5mm gewählt, um die zahlreichen Feinstrukturen möglichst vollständig abbilden zu können. Als erstes werden markante Stellen und deutlich sichtbare Kanten gescannt, da hier eine entsprechende Ausrichtung des Scankopfs besonders wichtig ist. Flächen mit homogenen Oberflächenverlauf (wie z.B. der Daumennagel) werden erst nachträglich – soweit noch erforderlich – aufgefüllt. Der Scanfortschritt wird fortlaufend am Monitor verfolgt, wobei der 3D-Gelenkmessarm bei Bedarf als Computermaus fungiert.

Da die anfallenden Datenmengen in dieser Auflösung erheblich sind, sollte bereits vorab eine entsprechende Datenverwaltungsstrategie festgelegt werden. Sollen etwa die ermittelten Daten direkt im Anschluss an eine Messung an den Auftraggeber weitergegeben werden, so können die zunächst überlappenden Scanstreifen im Messungsverlauf immer wieder sukzessive zu Teilflächen zusammgeführt werden, wodurch die insgesamt zu verwaltende Datenmenge immer wieder auf ein erträgliches Maß reduziert werden kann. Soll dagegen die Verweildauer vor Ort minimiert werden, so kann das 3D-Scanning zunächst abschnittsweise erfolgen. Für das Zusammenführung der Daten kommt dann auch ein häuslicher Nachbearbeitungsschritt in Frage.

Hier wurde für die abschließende Nachbearbeitung die scannerunabhängige Software *Raindrop Geomagic Studio 6.0* eingesetzt, vgl. Abb.4 (links). Kleinere verbliebene Lücken können damit entsprechend dem Oberflächenverlauf in ihrer

lokalen Umgebung geschlossen werden, weiterhin stehen auch hier Algorithmen zur Ausdünnung der Punktwolke in Abhängigkeit vom Oberflächenverlauf zur Verfügung. Anhand einer graphischen Darstellung der geometrischen Abweichungen zwischen originärer und ausgedünnter Oberflächenrepräsentation kann der Kompressionsgrad in Abhängigkeit von den tolerierbaren Abweichungen eingestellt werden.

Probeweise wird von „Der Daumen“ eine (verkleinerte) 3D-Kopie gefertigt. Als Grundlage dient der mit *Raindrop Geomagic Studio 6.0* erstellte wasserdichte STL-File. Die Herstellung des Modells erfolgt mit einem 3D-Printing System der Firma 3D Systems. Bei diesem System trägt der Drucker jeweils eine Schicht von 0,0045 mm Dicke auf. Das Modell wächst schichtweise in die Höhe, das Material ist hier ein Acryl-Photopolymer. Die Kopie hat eine Höhe von 33,82 mm und wurde in 5,75 Stunden gefertigt, vgl. Abb. 4 (rechts). Grundsätzlich stehen mit dem wasserdichten STL-Datensatz alle Möglichkeiten moderner Rapid Prototyping Techniken offen.

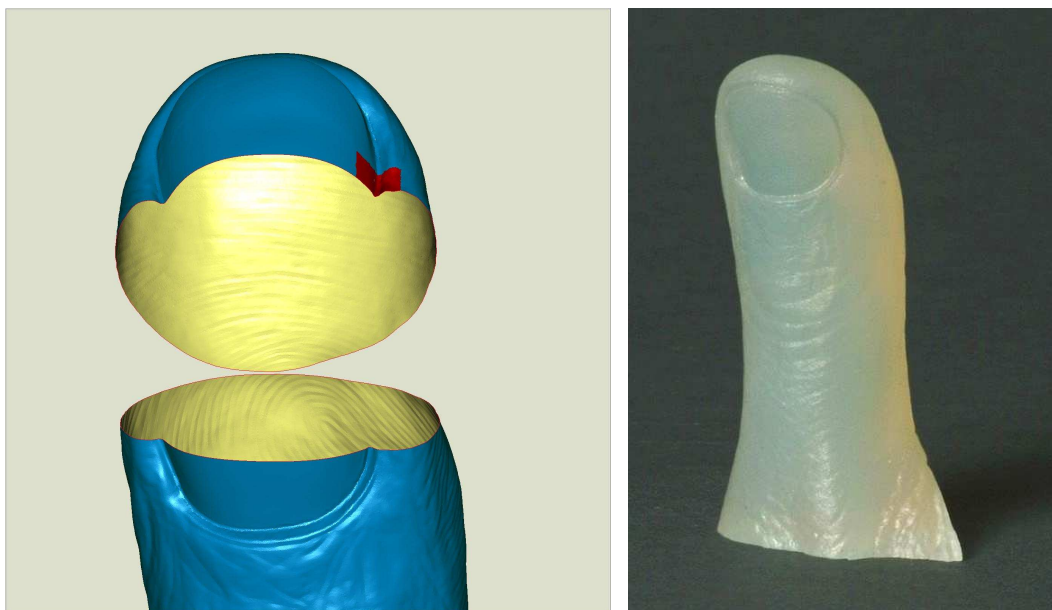


Abb. 4: „Der Daumen“: virtuell (links), als einfache 3D-Kopie (rechts).

Als weiteres Mittel der Präsentation von 3D-Daten sind Video-Animationen ein probates Mittel. Mit Hilfe von *3D Studio Max* kann der (ausgedünnte) STL-Datensatz direkt zur Generierung eines virtuellen Kamerafluges um das Geometriemodell herum herangezogen werden. Mit Hilfe von *Adobe Premiere* werden Überblendungen zwischen einer ersten Videosequenz mit Blick auf den schattiert dargestellten virtuellen Daumen und einer weiteren Videosequenz mit Blick auf das vereinfachte Drahtgittermodell des STL-Datensatzes realisiert. Das Resultat im AVI-Format kann auf den gängigen Multimediaplays abgespielt werden und steht im Internet zum Download zur Verfügung [Linscheid 2004].

4. FARBE, SCHATTEN UND RÄUMLICHE TIEFE

Die geometrische Auflösung, welche mit dem dargestellten System erzielt wird, liegt unter einem Zehntelmillimeter. Sowohl feine Detailstrukturen als auch Bearbeitungsspuren des Künstlers können grundsätzlich dokumentiert werden. Zur Veranschaulichung wird hier der Bereich der hinteren Daumenkuppe – der typische Fingerabdruck – en Detail betrachtet: Der visuelle Eindruck von Papillarleisten wird vom Künstler in erster Linie durch den Wechsel von stark und schwach spiegelnder Oberflächenfeinstruktur erzeugt, erst in zweiter Linie sind auch (allerdings kaum zu tastende) Tiefenunterschiede herausgearbeitet, vgl. Abb. 5 (links). Während in einem einfachen Tiefenbild ohne Einsatz eines zusätzlichen Shadings diese Strukturen nicht sichtbar sind – die Tiefenunterschiede der Papillarleisten fallen im Vergleich zum globalen Tiefenverlauf der gesamten hinteren Daumenkuppe äußerst gering aus, vgl. Abb. 5 (mittig) – so werden sie doch in den Daten präzise abgebildet, wie sich nach einer Freistellung der hochfrequenten Anteile des Tiefenbildes zeigt, vgl. Abb. 5 (rechts). Auf diese Weise ist eine einfache, präzise Quantifizierung der lokalen Tiefenunterschiede möglich, sie betragen im dargestellten Bereich weniger als einen Zehntelmillimeter. Trotzdem wird das Muster der Papillarleisten in bemerkenswerter Qualität abgebildet.

Das für die Berechnung der 32-Bit Tiefenbilder eingesetzte OSI-zertifizierte Java-Plugin *XYZ2DEM Importer* ist seitens des i3mainz als Open Source einschließlich einfacher Anwendungsbeispiele freigegeben [Schlüter 2005].



Abb. 5: Papillarleisten im Bereich der hinteren Daumenkuppe: Seitenansicht (links); Tiefenbild des „Fingerabdrucks“ im Bereich der hinteren Daumenkuppe (mittig), lokale Tiefenunterschiede im Bereich der hinteren Daumenkuppe (rechts).

5. FAZIT UND AUSBLICK

Das vorgelegte Beispiel zeigt auf, dass mit dem Einsatz eines handgeführten 3D-Scanners eine geometrisch präzise, „wasserdichte“ Beschreibung der Oberflächengeometrie der Bronzeplastik erreicht wird. Auch unter wirtschaftlichen Aspekten ist die gewählte Vorgehensweise äußerst vorteilhaft, die Vor-Ort-Arbeiten können problemlos an einem Tag abgeschlossen werden. Ein gutes Verständnis des gesamten Messprozesses ist wichtig, um eventuelle Nacharbeiten und die erforderlichen Rechenzeiten bei der Zusammenführung der einzelnen Scanstreifen bzw. bei der abschließenden Zusammenführung aller Teilflächen zum Gesamtobjekt möglichst klein zu halten.

6. DANK

Wir bedanken uns bei Herrn Dr. Klaus-D. Pohl vom Landesmuseum Darmstadt, dem Personal des Regierungspräsidiums Darmstadt und Herrn Thorsten Herbert von der Firma 3D Systems GmbH für die freundliche Unterstützung.

7. LITERATUR

BERNER, K., PFEIFFER, L., SCHLÜTER, M. UND WEIDES, C., 2004: Mit 3D-Scanning zur Erfassung des Knitterversagens von Sandwichpaneelen. Ingenieurvermessung, 15.-19. März 2004, Zürich.

BÖHLER, W. UND MARBS, A., 2004: Vergleich von 3D-Scanning und Photogrammetrie zur geometrischen Dokumentation im Denkmalsbereich. Schriftenreihe Informations- und Messtechnik, Band 5, Shaker Verlag, Aachen.

DÜRSMUTH, S., 2005: Erfassung und Kontrolle von Regelgeometrien und Freiformflächen mit einem mobilen 3D-Messarm, Fachhochschule Mainz, Diplomarbeit.

HENSEL, B., 2004: Pressenotiz, Darmstädter Echo vom 28.04.2004.

LINSCHIED, M., 2004: Realisierung einer mobilen Koordinatenmessmaschine zur Erfassung größerer Objekte, Fachhochschule Mainz, Diplomarbeit, <http://www.geoinform.fh-mainz.de/diplomarbeiten/1632/>.

SCHLÜTER, M., 2002: Marktüberblick: Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner - mechanisch, optisch, interferometrisch. 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 2002, Neubrandenburg, Publikationen der DGPF Band 11, 187-194.

SCHLÜTER, M., 2005: XYZ2DEM Importer - Tutorials, Examples, Applications. <http://www2.geoinform.fh-mainz.de/~mschlue/ij/xyz2dem-importer.php> bzw. <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/xyz2dem-importer.html> im Rahmen des Public Domain Angebots *ImageJ* des U.S. Department of Health and Human Services, NIH (National Institutes of Health).