# Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie

## THOMAS P. KERSTEN<sup>1</sup>, MAREN LINDSTAEDT<sup>1</sup>, KLAUS MECHELKE<sup>1</sup>, KAY ZOBEL<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Durch die stetig zunehmende Leistungsfähigkeit des Internets und der Computertechnologie sowie der raschen Weiterentwickelung von Computer Vision Algorithmen ist es heute möglich, die 3D-Geometrie von Objekten unterschiedlicher Größe mit handelsüblichen digitalen Kameras als Low-Cost Systeme für zahlreiche Anwendungen (Restaurierung, historische Denkmalpflege, Visualisierung, Analyse des Bauzustandes und der Beschädigung, etc.) effizient und flexibel in Bildsequenzen zu erfassen. Anhand von diversen Kulturobjekten (historische Gebäude, Statuen/Figuren, archäologische Fundstücke, etc.) wird in diesem Beitrag das Potential von Webservices und frei verfügbaren Softwarepaketen aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit fotorealistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Diese sogenannten Low-Cost Systeme stellen heute für die As-Built Dokumentation von 3D-Objekten in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie eine effiziente Alternative zu teuren terrestrischen Laserscanningsystemen dar. Die Genauigkeit der automatisch erzeugten 3D-Modelle wird durch den Vergleich mit Ergebnissen des terrestrischen Laserscannings aufgezeigt.

# 1 Einleitung

Für die präzise 3D-Erfassung komplexer Objekte werden heute je nach Größe des Objekts geodätische Messmethoden, photogrammetrische Mehrbildverfahren und zunehmend auch terrestrisches Laserscanning allein oder in Kombination eingesetzt. Die Anforderungen an die Erstellung von 3D-Modellen sind je nach Objekt mit den Kriterien Detail, Vollständigkeit, Zuverlässigkeit, Genauigkeit (geometrische und visuelle Qualität), Effizienz, Datenmenge, Kosten und Handhabbarkeit oft sehr hoch, aber mit unterschiedlicher Priorität angesetzt. Seit einigen Jahren gibt es jedoch auch eine große Anzahl von digitalen Kameras als passive Low-Cost Sensoren auf dem Markt, die mit entsprechenden Algorithmen wie Structure from Motion oder Dense Image Matching für verschiedene 3D-Anwendungen (Objektrekonstruktion, Navigation, Mapping, Tracking, Erkennung, Gaming etc.) effizient und erfolgreich eingesetzt werden und somit echte Alternativen zu klassischen Systemen und Methoden darstellen. Aufgrund der sehr geringen Kosten und der Open-Source Faszination erreichen heute solche Systeme mit den entsprechenden Algorithmen (Tools) große Aufmerksamkeit in vielen Anwendungsbereichen. Dennoch darf dabei der metrologische Aspekt nicht außer Acht gelassen werden, wenn man sie als seriöse Mess- und Modellierungsverfahren anerkennen will. Es müssen anhand von Zahlen klare Aussagen über das Genauigkeitspotential solcher Systeme getroffen werden, indem aktive und passive Low-Cost Sensoren und die dazugehörigen Open-Source und Low-Cost Bildverarbeitungssoftware als System auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden. In diesem Zusammenhang müssen auch die Ergebnisse der 3D-Modellierung analysiert und ggf. mit Referenzdaten verglichen werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> HafenCity Universität Hamburg, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt, Klaus.Mechelke, Kay.Zobel]@hcu-hamburg.de

Praktische Beispiele für bildbasierte Modellierung (REMONDINO & MENNA 2008) und Vergleiche zwischen bildbasierten und distanzbasierten Verfahren zeigen REMONDINO et al. (2008) für die Dokumentation von Kulturdenkmälern. BARAZZETTI et al. (2009) stellen den kombinierten Einsatz von photogrammetrischen und Computer Vision Verfahren für die automatische und genaue 3D-Modellierung von terrestrischen Objekten vor. Sie zeigen in ihrem Artikel, dass mit bildbasierten und distanzbasierten Aufnahmesystemen ähnliche Resultate erreicht werden können.

In diesem Beitrag wird das Potential von Webservices und frei verfügbaren Softwarepaketen anhand von praktischen Beispielen aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit foto-realistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Nach einer kurzen Vorstellung der eingesetzten Software in Kapitel 2 wird der gesamte Arbeitsablauf für das bildbasierte Low-Cost 3D-Rekonstruktionsverfahren (Kapitel 3) aufgezeigt. Die praktischen Ergebnisse und 3D-Vergleiche mit Referenzdaten werden in Kapitel 4 zusammengefasst.

# 2 Eingesetzte Software

Für die Untersuchungen zur automatischen Generierung von 3D-Punktwolken und 3D-Oberflächenmodellen aus Bilddaten wurden folgende Softwarepakte bzw. Webservices eingesetzt: Bundler/PMVS2 (Open-Source Software), Microsoft Photosynth (Webservice) und Autodesk Photofly bzw. 123D Catch Beta (Webservice).

## 2.1. Bundler/PMVS2

Bundler (SNAVELY et al. 2008) und PMVS2 (Patch-based Multi-view Stereo Software, FURUKAWA & PONCE 2010) wurden an der Universität von Washington in Seattle (USA) in C und C++ unter der GNU General Public License als frei verfügbare Software entwickelt. Bundler arbeitet als Structure-from-Motion (SfM) System für beliebig angeordnete Bilddaten und wurde für das Photo Tourism Project von Microsoft entwickelt (SNAVELY et al. 2006). Die Merkmalsextraktion in den Bildern erfolgt durch den SIFT-Algorithmus (Scale-Invariant Feature Transform - skaleninvariante Merkmalstransformation) von LOWE (2004). Die Software liefert für einen beliebigen Bilddatensatz die Kalibrierungsdaten der Kamera, die Bildorientierungen und eine dünn besetzte 3D-Punktwolke (Szenengeometrie) durch eine modifizierte Bündelblockausgleichung von LOURAKIS & ARGYROS (2004) als Ausgabe. Die Ergebnisse von Bundler werden in PMVS2 verwendet, um durch Dense Image Matching eine dichtere Punktwolke nicht-bewegter Objekte zu generieren. Dabei erhält jeder Punkt neben der 3D-Koordinate auch die Farbwerte des Objektes aus den Bildern. Für den Einsatz an der HCU Hamburg wurde eine Benutzeroberfläche (Abb. 1 links) erstellt, die den Arbeitsablauf der benötigen Softwareteile automatisiert, d.h. nach Eingabe der Bilder laufen Bundler und PMVS2 automatisch nacheinander ab und das Ergebnis wird in Meshlab dargestellt. Für den beschleunigten Ablauf von Bundler/PMVS2 wurde an der Universität von Washington eine graphische Benutzeroberfläche (siehe Abb. 1 rechts) entwickelt, bei dem die rechenintensiven Prozesse auf der GPU (Graphics Processing Unit) ablaufen (WU 2007, WU 2011).

2 zRundler - © Kay Zobel, HCU Hamburg, 2011		No. of Concession, Name	VisualSFM - [S	parse Recor	nstruction	] - [0] - []					
ImageMagick EXIF Tool			Eile SfM View VIP Rep Iools Help								
				<b>- 12</b> R		B 🖬	14 #	3+ Hil 🜮	X 🗰 i	BA 55	11 🦦
Brages in TIFF former must be converted into JPEGs before processing. To do the, On 32-bit machines it is exerctimes advantageous to devide high resolution pictures offservises all well crash. To do this, enable the CROP checkbox.	endole the TIFF into four parts be	checkbox. Coulee					u/se si				
C:/Potable Apps/combundler/examples/tongotki_petrogifico_1\TIP\	1	TITI directory					1. Star	X	. J		
G/'projekte'\qata''photos\110919_kata''b4\		JPEG drectory			( and a second	S. 10 4	Page 1	120	then a	19.2	
E1photo/2011/110317_oiteme/photogrammety_poivet_joef-orp/	0	CROF dredary			M		a land	ALL ALL	ALL A		
Conversion					A	120	1000	1937 A	(3)		
le		-			and the second		- x4	723	à		
File and DB Informations						1. 1.			all is	G.N.G.	
fite Name				150	1 10				2		
Maket Model:			4	12		12	100 K				
Inspitieght			10	Astro	1.10		1150	S. C.			
Type:				1 A	300	104	100				
				$\mathbb{Z}$		10	500				
Camera DB			A A	VI	P	1.19					
Bundler			1 Mar			A Sector					
-maxPhoto Decension = 2000 +			/ WAR	62.50	1	1					
PMVS			/ AVAR		GAW.						
MeshLab			No.	Real of							
Stat			· 资格	200 m	1.10						
			alle and	A	1.4						

Abb. 1: HCU-Benutzeroberfläche für den automatischen Ablauf von Bundler/PMVS2 (links) und graphische Oberfläche für den beschleunigten Ablauf von Bundler/PMVS2 mit VisualSFM (rechts).

## 2.2. Microsoft Photosynth

Photosynth ist aus dem Photo Tourism Project in Zusammenarbeit zwischen Microsoft Live Labs und der Universität von Washington entstanden (Snavely et al. 2006). Die Grundlage für die automatische Erstellung von 3D-Punktwolken durch kostenlose Datenprozessierung mit dem externen Webservice ist die Software Bundler. Für die Nutzung von Microsoft Photosynth ist zunächst ein Programm für das Hochladen und die Übertragung der Bilder an einen Server und eine Windows Live ID (z.B. eMail-Adresse) erforderlich. Je nach Anzahl der Bilder kann ein Ergebnis einige Sekunden oder auch wenige Minuten später online in allen gängigen Browsern betrachtet werden, jedoch ist kein Zugriff auf die Daten vorhanden. Erst durch das externe Programm SynthExport (HAUSNER 2010) lassen sich die berechneten Punkte und die Kameraparameter exportieren, aber die Ergebnisse entsprechen denen von Bundler.

### 2.3. Autodesk Photofly/123D Catch Beta

Im Sommer 2010 stellte Autodesk das Projekt Photofly vor, bei dem es sich um einen freien Webservice handelt, mit man aus mindestens fünf sich überlappenden Bildern automatisch ein vermaschtes 3D-Modell des aufgenommenen Objektes ableiten kann (ABATE et al. 2011). Grundlage dieser Software ist die Software smart3Dcapture von der französischen Firma acute3D in Nizza, deren grundlegende Algorithmen durch COURCHAY et al. (2010) beschrieben werden. Photofly verwendet Algorithmen aus den Bereichen Computer Vision und Photogrammetrie als Grundlage und nutzt die Leistungsfähigkeit von Cloud Computing aus, um effizient 3D-Modelle aus 2D-Bilddaten zu erstellen.

Photofly nutzt den "Autodesk Photo Scene Editor", der auf dem Anwender-Computer installiert werden muss, als Kommunikationsplattform zwischen Anwender und Server. Über die sehr übersichtliche Benutzeroberfläche dieser Software werden die ausgewählten Bilder auf den Server übertragen und das je nach Komplexität in kurzer Zeit (d.h. in einigen Minuten bis in wenigen Stunden) erstellte 3D-Modell kann dort auch bearbeitet werden. Wichtige Funktionen stellen das Auswählen von Teilen der Dreiecksvermaschung, Navigationsoptionen, das Auswählen von Punkten und das Festlegen einer Referenzstrecke für die Skalierung des Modells dar. Einzelne Bilder können noch nachträglich durch Messung von identischen Punkten (Verknüpfungspunkte) in das Modell eingefügt werden. Für die Generierung eines 3D-Modells stehen die drei Qualitätsstufen Mobile, Standard und Maximum (best-mögliches Ergebnis) zur Verfügung. Die Ergebnisse können in verschiedene Formate (z.B. OBJ oder LAS) exportiert werden. Im November 2011 wurde Photofly durch 123D Catch Beta abgelöst, nachdem im Oktober 2011 die Firma acute3D ihre Software smart3Dcapture der Öffentlichkeit vorgestellt hatte. Die graphischen Benutzeroberflächen der beiden Softwarepakete sind in Abb. 2 dargestellt.



Abb. 2: Graphische Benutzeroberflächen für die Software Autodesk Photofly (links) und 123D Catch Beta (rechts) als Schnittstelle zum Webservice.

# 3 Arbeitsablauf

Der generelle Arbeitsablauf für das bildbasierte 3D-Rekonstruktionsverfahren mit Low-Cost Systemen ist in Abb. 3 veranschaulicht. Dabei ist der Automationsgrad der einzelnen Arbeitsschritte farblich gekennzeichnet (rot = manuell, gelb = interaktiv und grün = automatisch).



Abb. 3: Arbeitsablauf für das bildbasierte Low-Cost 3D-Rekonstruktionsverfahren.

Bei der photogrammetrischen Objektaufnahme werden viele Bilder vom Objekt von verschiedenen Standpunkten gemacht, wobei eine Abdeckung des jeweiligen Objektteiles von mindestens drei, jedoch besser von fünf Bildern aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen sollte. Nach Eingabe in die jeweilige Auswertesoftware werden die (äußeren) Bildorientierungen und die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) automatisch berechnet. Die anschließende Erstellung von 3D-Punktwolken oder 3D-Oberflächenmodellen erfolgt in der Software auch vollautomatisch. Erst bei der 3D-Transformation der Punktwolke oder des vermaschten Modells in ein übergeordnetes Koordinatensystem greift der Anwender durch Messung von Passpunkten interaktiv ein. Das daraus dann abgeleitete 3D-Modell ist bereits durch die verwendeten Bilddaten automatisch foto-realistisch texturiert, so dass daraus automatisch Videosequenzen (z.B. in 123D Catch Beta) generiert werden können. Wenn aus einer transformierten und georeferenzierten, farbigen 3D-Punktwolke ein CAD-Modell konstruiert werden soll, erfolgt eine manuelle Weiterverarbeitung in einem CAD-Programm (z.B. AutoCAD) durch den Anwender. Das 3D-CAD-Modell kann anschließend in einer Visualisierungssoftware (z.B. 3D Studio, Cinema4D, Maya, etc.) mit den digitalen Bildern manuell texturiert werden, um daraus interaktiv Visualisierungen und/oder Videosequenzen abzuleiten. NEITZEL et al. (2011) stellen den Arbeitsablauf für ein Low-Cost-System, einen Genauigkeitsvergleich verschiedener Softwarepakte und mit der Erfassung einer Deponie ein praktisches Beispiel vor.

# 4 Ergebnisse & 3D-Vergleich

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der eingesetzten Software Microsoft Photosynth, Bundler/PMVS2 und Autodesk Photofly bzw. 123D Catch Beta für die Anwendungsbereiche Architektur, Denkmalpflege und Archäologie vorgestellt, wobei einzelne Datensätze auch mit Referenzdaten vom terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006h von der Firma Zoller+Fröhlich verglichen wurden.

#### 4.1. Architektur

In Abb. 4 sind die Ergebnisse von Photosynth, Bundler/PMVS2 und Photofly für die Frontfassade des Alt-Segeberger Bürgerhauses – eines der ältesten Gebäude in Schleswig-Holstein aus dem Jahr 1539 mit der Frontfassade von 1606 – dargestellt. Die verwendeten 19 Bilder wurden im Rahmen eines studentischen Projektes der HCU Hamburg mit einer Nikon D90 (Objektiv Nikkor 20mm) von verschiedenen Positionen aufgenommen. Das Ergebnis aus Photosynth ist mit 20.237 Punkten für eine Fassadenmodellierung nicht zu gebrauchen, während Photofly mit 272.350 Punkten und 515.442 Dreiecken das visuell ansprechendste Ergebnis lieferte. Jedoch wurden mit Photofly an den Fassadenseiten und an den Dachkanten sogenannte virtuelle Punkte vermascht, die nicht existieren (siehe dazu auch Abb. 2 links).



Abb. 4: Frontfassade des Bürgerhauses in Bad Segeberg (19 Bilder der Nikon D90 mit 20 mm Objektiv): Punktwolke aus Photosynth (links) und Bundler/PMVS2 (Mitte) sowie die Dreiecksvermaschung aus Photofly (rechts).

Mit Bundler/PMVS2 konnte eine dichte Punktwolke von 1.016.874 Punkten erzeugt werden. Die Dreicksvermaschungen der Fassade erfolgten für die Daten von Bundler/PMVS2 mit Geomagic. Die vermaschten 3D-Fassaden von Bundler/PMVS2 und von Photofly sind im Vergleich zu den Referenzdaten des IMAGER 5006h in Abb. 5 visualisiert. Mit Bundler/PMVS2 konnten einige Stellen an den schwarzen Fachwerkbalken wie mit dem Scanner nicht gemessen werden, so dass kleine Lücken vorhanden sind (Abb. 5 links). Die Dreiecksvermaschung von Photofly zeigt eine verrauschte Fassade mit ausgeprägten Artefakten an den Rändern (Abb. 5 Mitte), bei der Lücken einfach geschlossen wurden.



Abb. 5: Dreiecksvermaschung der Frontfassade vom Bürgerhaus in Bad Segeberg: Bundler/PMVS2 (links), Photofly (Mitte) und IMAGER 5006h (rechts).

Die Maßstabsanpassung der Daten von Bundler/PMVS2 und Photofly erfolgte für die Fassade durch Messung von zwei photogrammetrischen Passpunkten an der Fassade, über deren Strecke die beiden Datensätze skaliert wurden. Vor dem eigentlichen 3D-Vergleich wurden beide Datensätze mit einem Iterative Closest Point Algorithmus in Geomagic zu den Laserscanningdaten registriert. Beim 3D-Vergleich mit den Laserscanningdaten zeigt Bundler/PMVS2 ein deutlich besseres Resultat als Photofly (Abb. 6 Mitte und rechts), denn die meisten Differenzen sind dort kleiner als 3 mm (grüne Flächen). Aufgrund der deutlich höheren Punktmenge konnte man das geometrisch bessere Resultat erwarten.



Abb. 6: Registrierung mit ICP von Bundler/PMVS2 zu IMAGER 5006h (links) und 3D-Vergleich mit IMAGER 5006h (grün < 3mm): Bundler/PMVS2 (Mitte) und Photofly (rechts).

Um die Berechnungszeiten einschätzen zu können, wurde ein Rundum-Bildverband von 41 Bildern mit der Nikon D90 (Objektiv Nikkor 20 mm) vom Baumhaus im Alten Hafen von Wismar (Abb. 7) mit Bundler/PMVS2 und VisualSFM (= Bundler auf GPU) berechnet. Der verwendete Rechner hatte einen Intel Xeon CPU E5540 Prozessor mit 2.53 GHz, einen internen Speicher von 24 GB RAM und lief auf dem Betriebssystem Windows 7 Enterprise (64 Bit). Die Berechnung in Bundler/PMVS2 dauerte 11 Stunden und lieferte 1.641.871 Punkte, während die Rechenzeit von VisualSFM mit nur 27 Minuten um den Faktor 24 schneller war. Allerdings wurden ca. 270.000 Punkte weniger gemessen, was sich in einigen Lücken besonders in den Dachbereichen widerspiegelte (Abb. 7). Das Ergebnis von 123D Catch Beta war geometrisch nicht brauchbar, da einige Bereiche an den Hausfassaden verzerrt und die Dachbereiche sehr lückenhaft waren.



Abb. 7: Baumhaus im Alten Hafen von Wismar – Punktwolke der Frontansicht (links) und des Daches (rechts) mit VisualSFM (jeweils links) und Bundler/PMVS2 (je rechts).

#### 4.2. Denkmalpflege

Exemplarisch für Anwendungen in der Denkmalpflege sind die Ergebnisse einer Figur aus dem Dresdner Zwinger in Abb. 8 dargestellt. Die Figur wurde in zwei unterschiedlichen Höhen mit einer Nikon D90 in 15 Bildern mit einem Nikkor Zoom-Objektiv (Brennweite 28 mm) aufgenommen. Photofly konnte aus 155.697 Punkten eine visuell ansprechende, fast lückenlose Vermaschung mit 285.669 Dreiecken rechnen (Abb. 8 links), während bei Bundler/PMVS2 trotz 917.965 Punkte leichte Lücken vorhanden waren (Abb. 8 Mitte) und in Photosynth mit nur 18.553 Punkten eine sehr geringe Punktdichte gemessen wurde. Leider lagen für diese Figur keine Referenzdaten vor, so dass eine geometrische Analyse nicht erfolgen konnte.



Abb. 8: Figur im Dresdner Zwinger – Photofly (links), Bundler/PMVS2 (Mitte) und Photosynth (rechts).

### 4.3. Archäologie

Es zeigte sich gerade bei archäologischen Objekten, dass Photofly bzw. 123D Catch Beta visuell recht ansprechende 3D-Modelle von kleineren und eher rundlichen Objekten liefern konnte. Ein Moai vom Krater Poike auf der Osterinsel (Chile) wurde mit einer Nikon D70 (Nikkor Zoom-Objektiv mit 35 mm) in 27 Bildern rundherum aufgenommen. Das Ergebnis der Berechnung mit 123D Catch lieferte ein nahezu lückenloses, texturiertes 3D-Modell (Abb. 9) mit 169.131 Dreiecken (aus 85.092 Punkten), während mit Bundler/PMVS2 trotz fast 630.000 Punkten einige Lücken am Hals und am Übergang Figur zu Boden vorhanden waren. Allerdings konnte eine geometrische Genauigkeitsanalyse wegen fehlender Referenz-daten noch nicht durchgeführt werden.



Abb. 9: Kleiner Moai (Höhe 0,7 m) von Poike auf der Osterinsel (Chile) – v.l.n.r. gemessene Punkte, Dreiecksvermaschung, texturiertes 3D-Modell jeweils aus 123D Catch Beta und als Vergleich die gemessenen Punkte aus Bundler/PMVS2 (rechts)



Abb. 10: Schwarzer Obsidian-Stein als Augenrückseite eines Moai auf der Osterinsel – Punktwolke vom IMAGER 5006i (links), aus Bundler/PMVS2 (Mitte) und vermaschtes 3D-Modell aus 123D Catch Beta (rechts)

Bei der Erstellung eines 3D-Modells von einer Moai-Augenrückseite aus Obsidian konnte nur 123D Catch Beta erfolgreich eingesetzt werden, denn sowohl mit dem Laserscanner IMAGER 5006i, als auch mit Bundler/PMVS2 konnten jeweils nur eine sehr verrauschte Punktwolke mit einigen Lücken generiert werden (Abb. 10). Für das Dense Matching mit 123D Catch Beta und Bundler/PMVS2 wurden die Bilddaten von folgenden Kameras zusammen verwendet: a) 27 Fotos der Pentax Optio X (2560 x 1920) mit 10 mm Brennweite, b) zehn Fotos einer Nikon D70 (3008 x 2000) mit einer Brennweite von ca. 40 mm und c) elf Fotos einer Nikon D80 (3872 x 2592) mit einer Brennweite von 50 mm. Das von 123D Catch Beta generierte texturierte 3D-Modell der Augenrückseite besteht aus 291.613 Dreiecken (Abb. 10 rechts), während mit Bundler/PMVS2 insgesamt nur 214.940 und mit dem IMA-GER 5006i nur 95.820 Punkte gemessen wurden. Auch hier konnte kein 3D-Vergleich mit Referenzdaten zur Genauigkeitsbetrachtung gemacht werden, aber das erstellte 3D-Modell entsprach subjektiv betrachtet dem Original sehr gut. Eine Skalierung des Modells konnte aufgrund fehlender Informationen noch nicht vorgenommen werden.

Für die nächsten beiden Beispiele (Holzpfosten und Gefäß aus Yeha/Äthiopien) waren Referenzdaten vorhanden. Die verkohlten Reste eines ca. 2800 Jahre alten Holzpfostens wurden mit einer Nikon D200 (Nikkor Zoomobjektiv 35 mm) durch 43 Bilder aufgenommen. Die Bilddaten wurden sowohl mit Bundler/PMVS2 mit einer Bildauflösung von 2400 Pixeln, als auch mit Photofly mit maximaler Bildauflösung von 4288 Pixeln ausgewertet, d.h. eine Punktwolke (723.136 Punkte) und ein 3D-Modell (ca. 300.000 Dreiecke) wurden berechnet (Abb. 11). In den Objektraum wurde für die Aufnahme zusätzlich ein kleiner Maßstab gelegt, der die spätere Skalierung der beiden Datensätze ermöglichte.



Abb. 11: Reste eines Holzpfostens (archäologisches Fundstück) in Yeha (Äthiopien) – jeweils zwei Ansichten der Punktwolke aus Bundler/PMVS2 (links) und des 3D-Modells aus Photofly (rechts)

Als Referenz wurde das Objekt auch mit dem IMAGER 5006h von vier Stationen aus gescannt. Die registrierten Punktwolken wurden in Geomagic auf einen regelmäßigen Punktabstand von 3 mm gefiltert, die resultierende Vermaschung ergab ca. 350.000 Dreiecke (Abb. 12 links). Vorab wurden die Scandaten durch einen Rauschfilter leicht geglättet. Nach einer ICP-Registrierung der jeweiligen Daten mit den Scandaten wurde in Geomagic ein 3D-Vergleich gerechnet. Die beiden Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Differenzen vom jeweiligen Datensatz zur Referenz, die unter einem Millimeter liegen, sind grün gekennzeichnet. Bei diesem Vergleich zeigt es sich, dass das Differenzbild von Bundler/PMVS2 zum IMAGER 5006h weniger grüne Flächen als das von Photofly aufweist. Beide Datensätze sind jedoch mit dem Ergebnis des Laserscannings auf ±3 mm weitgehend identisch. Da die Bilddaten in diesem Fall eine höhere Auflösung als die Scandaten lieferten, ging es hier in erster Linie um die Aufdeckung grober Fehler in den Modellen aus den Bilddaten, die hier nicht auftraten. Ein 3D-Vergleich zwischen der geringen und der maximalen Auflösung bei 123D Catch Beta zeigte keine signifikanten geometrischen Unterschiede.



Abb. 12: Dreiecksvermaschung des Holzpfostenrests (Referenzdaten vom IMAGER 5006h, links) und 3D-Vergleich IMAGER 5006h / Bundler/PMVS2 (Mitte) und IMAGER 5006h / Photofly (rechts) (grün < 1 mm).

Als ein weiteres Objekt der archäologischen Fundstücke der Grabung in Yeha (Äthiopien) wurde ein Gefäß (Keramik) durch eine Kamera und durch einen Laserscanner aufgenommen, um die bildbasierte und distanzbasierte Objekterfassung miteinander zu vergleichen. Das Gefäß (Abb. 13) wurde im oberen Bereich mit 50 Bildern und im unteren Bereich mit 30 Bildern einer Nikon D40 (Nikkor Zoomobjektiv, Brennweite 34 mm) aufgenommen. Mit dem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006h wurden neun Scans für die vollständige Erfassung des Objektes durchgeführt. Aus den registrierten Scans wurde in Geomagic die Dreiecksvermaschung des Gefäßes (ca. 160.000 Dreiecke) berechnet. Die Bilddaten wurden mit Bundler/PMVS2 mit einer Bildauflösung von 2400 Pixeln ausgewertet, d.h. eine Punktwolke wurde für den oberen und unteren Objektteil getrennt generiert (Abb. 13). Über den zusätzlich für die Aufnahmen in den Objektraum gelegten Maßstab (10 cm) erfolgte die Skalierung der beiden Datensätze, die anschließend in Geomagic mit ICP zueinander registriert wurden. Nach ICP-Registrierung der beiden 3D-Modelle erfolgte der 3D-Vergleich in Geomagic, der nur an den Randbereichen und denen mit großer Krümmung eine größere Differenz als einen Millimeter zeigte (Abb. 13). Diese lassen sich durch die höhere Auflösung der Bilddaten im Vergleich zu den mehr geglätteten Scandaten erklären. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 0.4 mm.



Abb. 13: v.l.nr. Gefäß aus Yeha (Äthiopien) mit Maßstab zur Skalierung der Ergebnisse, oberes und unteres Objektteil sowie zusammengesetztes Objekt aus Bundler/PMVS2, vermaschtes und geglättetes 3D-Modell des Gefäßes vom IMAGER 5006h, Ergebnis des 3D-Vergleichs (grün < 1 mm).</p>

# 5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden kostengünstige bildbasierte Aufnahmen und Modellierungsverfahren vorgestellt, mit denen detaillierte und genaue 3D-Oberflächenmodelle aus terrestrischen Bildern für Anwendungen in der Architektur, Denkmalpflege und Archäologie generiert werden können, die vergleichbar mit Ergebnissen von teuren terrestrischen Laserscannern sind. Die Objektaufnahme mit Kameras ist einfach, sehr schnell, sehr flexibel und sehr kostengünstig. Das gesamte Verfahren ist weitgehend automatisiert und funktioniert auch ohne Zielmarken als Passpunkte, wenn nur ein Maßstab zur Objektskalierung ausreicht. Die verwendete Software Bundler/PMVS2 und der Webservice Photofly bzw. 123D Catch Beta generieren je nach Objektgröße und -form gleichwertige 3D-Daten im Vergleich zu terrestrischen Laserscannern. Die Zuverlässigkeit der Systeme muss jedoch noch verbessert werden. In einigen Fällen waren die erreichten Ergebnisse geometrisch nicht verwertbar. Da die Resultate abhängig von der eingesetzten Software sehr unterschiedlich waren, konnte man diese Probleme nicht unbedingt auf die Aufnahmegeometrie zurückzuführen. Je nach Objektmaterial und Beleuchtung wurden mit Bundler/PMVS2 verrauschte Punktwolken erzeugt. Photofly/123D Catch Beta zeigte eher bei kleinen und rundlichen Objekten visuell sehr ansprechende (geglättete) Resultate, wobei kleine Löcher automatisch geschlossen werden. Die Ergebnisse von Photosynth sind für die 3D-Modellierung nur zu gebrauchen, wenn sie mit PMVS2 weiterverarbeitet werden können, da ansonsten die Punktdichte zu gering ist. Dennoch sind weitere Untersuchungen mit anderen Aufnahmeverfahren wie Streifenprojektion oder Nahbereichsscannern bei kleinen Objekten erforderlich, um gesicherte Aussagen über die geometrische Qualität treffen zu können.

Bei den in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen zeigte es sich, dass Bundler/PMVS2 bei größeren Objekten leistungsfähiger als Photofly/123D Catch Beta war, obwohl die Berechnungszeiten erheblich länger waren. Die deutlich kürzere Verarbeitungszeit beim Webservice lässt darauf schließen, dass Autodesk reichlich Rechen-Ressourcen für diesen Dienst zur Verfügung stellt. Durch den optionalen Einsatz von Webservices konnten nicht nur die eignen Rechenkapazitäten geschont werden, sondern es wird dadurch ein deutlicher Zeitgewinn gegenüber der Berechnung am eigenen PC erreicht. Doch die Voraussetzung einer schnellen Internetverbindung ist nicht immer gegeben, gerade beim Einsatz in der Archäologie muss oft auf die lokale Infrastruktur zurückgegriffen werden, so dass eine Nutzung der Software, die hinter den Webservices steckt, auf dem eigenen PC wünschenswert wäre. Außerdem sollten beim Einsatz von Webservices auch Aspekte des Datenschutzes nicht außer Acht gelassen werden,

Durch die sinnvolle Kombination von Computer Vision Algorithmen und photogrammetrischen Verfahren wird der Arbeitsablauf von der Objekterfassung, über die 3D-Modellierung bis zur Visualisierung automatisiert, ohne die geometrische Genauigkeit signifikant zu vernachlässigen. Die Verfahren stehen dabei in ihrer Entwicklung erst am Anfang, da die Geschwindigkeit solcher Algorithmen durch die zukünftige Implementierung der Software auf den Graphikprozessor (GPU) signifikant erhöht und die gegenseitige Integration beider Verfahren noch erheblich optimiert werden kann. Mittlerweile gibt es aus dem Bereich der Computer Vision eine große Anzahl von Algorithmen für das pixel-basierte Matching in Stereooder Multi-View Bildern mit unterschiedlichem Leistungspotential (SCHARSTEIN & SZELISKI 2009).

Nachdem das airborne und terrestrische Laserscanning seit mehr als 10 Jahren eine dominierende Stellung auf dem Markt bei der flächenhaften Datenerfassung erarbeitet hat, kommen photogrammetrische Verfahren mit Unterstützung der Computer Vision und der zunehmend leistungsfähigeren Computertechnologie durch ihre Effizienz vehement zurück – Photogrammetry Reloaded.

## 6 Literaturverzeichnis

- ABATE, D., FURINI, G., MIGLIORI, S. & PIERATTINI, S., 2011: Project Photofly: New 3D Modelling Online WEB Service. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(5/W16), http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/abate etal.pdf.
- BARAZZETTI, L. REMONDINO, F. & SCAIONI, M., 2009: Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. Proc. of SPIE Optics+Photonics, Vol. 7447, 2-3 August, San Diego, CA, USA.
- COURCHAY, J., PONS, J.-P., MONASSE P. & KERIVEN, R., 2010: Dense and Accurate Spatiotemporal Multi-view Stereovision. Computer Vision – ACCV 2009, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5995, 11-22.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32(8): 1362-1376.
- HAUSNER, C., 2010: SynthExport. http://synthexport.codeplex.com/, besucht am 04.01.2012.
- LOURAKIS, M.I.A. & ARGYROS, A.A., 2004: Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. Institute of Computer Science, Heraklion, Crete, Greece - FORTH-ICS, Tech. Rep. 340, http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba.
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 60(2): 91-110.
- NEITZEL, F., KLONOWSKI, J., SIEBERT, S. & DASBACH, J.-P., 2011: Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung. AVN – Allgemeine Vermessungsnachrichten 10: 336-347.
- REMONDINO, F. & MENNA, F., 2008: Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5-1): 199-206.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., GRUEN, A. & ZHANG, L., 2008: Turning images into 3-D models. IEEE Signal Processing Magazine, 25(4): 55-65.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2009: Middlebury Stereo Vision Page. http://vision.middlebury.edu/stereo/, besucht am 7.1.2012.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2006: Photo tourism: exploring photo collections in 3D. ACM Trans. Graph. 25(3): 835-846.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2008: Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision 80(2): 189-210.
- WU, C., 2007: SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT). http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu.

WU, C., 2011: VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/.