

DRONARCH - Drone Supported Reconstruction Of Natural Environment and Archaeological and Cultural Heritage

Niclas Scheuing

*Institut für Archäologische Wissenschaften, Archäologie der
Römischen Provinzen, Universität Bern*

2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Definition	1
1.2	Klassische Dokumentation	1
1.2.1	Fotodokumentation	1
1.2.2	Zeichnungsdokumentation	2
1.2.3	Beschrieb	2
1.3	Fehlende Dimension	2
2	Motivation	4
2.1	Ziel dieser Arbeit	4
2.2	Theoretischer Ansatz	4
2.2.1	Mehrwert	5
2.2.2	Aufwand	5
2.2.3	Qualität	5
2.2.4	Integration	5
2.3	DRONARCH	5
3	Aktueller Forschungsstand	6
3.1	3D Scans	6
3.1.1	Laser Scanner	6
3.1.2	Structure from Motion und Multiview Stereo	7
4	DRONARCH	8
4.1	Entwicklung	8
4.2	Workflow	9
4.2.1	Bilder Erfassen	9
4.2.2	Verarbeitung	9
4.2.3	Betrachtung	9
4.3	Evaluation mittels DRONARCH	9
5	Implementierung	10
5.1	Computer Vision	10
5.1.1	Structure from Motion	10
5.1.2	Multiview Stereo	10
5.2	Implementierung	10
5.2.1	Verwendete Technologie	10

6 Resultate	11
6.1 Scans kleiner Objekte	11
6.2 Fallstudien	11
6.2.1 Test mit vorhandenen Bildern	11
7 Fazit	12
7.1 Schwierigkeiten	12
7.1.1 Unkontrolliert, Detailgrad wählen	12
7.2 Weitere Forschung	12
7.2.1 Automatisierte Bilderfassung	12
7.2.2 3D Druck	12
A Begriffe	13
A.1 Point Cloud	13
A.2 Mesh	13
A.3 Orthofoto	13
A.4 Digitales Höhenmodell	13
B DRONARCH verwenden	14
B.1 Tipps zum Aufnehmen von Fotos	14
B.2 Parameter	14
Bibliography	15

Kapitel 1

Einleitung

Ziel der Archäologie ist das Erhalten und Verstehen von materiellen Spuren vergangener Zeit. Dazu gehören Ausgrabungen, die gezielt archäologische Befunde freilegen und diese dabei teilweise zerstören. Die Information, die Befunde liefern können also nicht im Original erhalten werden, sondern müssen laufend dokumentiert werden. Diese Dokumentation bildet die Grundlage für die Interpretation und Auswertung durch heutige und zukünftige Archäologen. Das Erfassen dieser Informationen ist dadurch ein ausgesprochen wichtiger Punkt und die kritische Diskussion seiner Methodik verdient einige Aufmerksamkeit.

1.1 Definition

Dokumentation ist in erster Linie Erfassen von möglichst viel und möglichst exakten Informationen. Generalisierung und Selektion ist nur notwendig, wenn die vorhandenen Informationen Mangels Technik, Zeit, Geld oder Lagermöglichkeiten nicht festgehalten werden können und ein Abwägen des Nutzen-Kosten Verhältnisses nötig ist. Ist es etwa sinnvoll Tonnen von Dachziegeln zu fotografieren, zeichnen und archivieren, oder reichen einige repräsentative Exemplare? Idealerweise sollten *alle* Informationen erhalten bleiben.

1.2 Klassische Dokumentation

Der Archäologische Dienst des Kantons Bern (ADB) schreibt in seinem Handbuch: "Zeichnungsdokumentation, Beschrieb und Fotodokumentation sind die drei Standbeine der Grabungsdokumentation." Ref. des Kantons Bern ????

1.2.1 Fotodokumentation

Fotos bilden visuelle Informationen mit wenig Verfälschung ab. Sie zeigen die Situation auf eine sehr natürliche Weise und sind wenig von Interpretation beeinflusst. Beim Fotografieren können die Wahl von Standort, Bildausschnitt,

Objektiv und Lichtverhältnis einen gewissen Einfluss auf deren Interpretation haben. Zudem ist die erreichbare Qualität eines Fotos durch die verwendete Ausrüstung beschränkt. So können wichtige Details verloren gehen, wenn schlecht Fotografiert werden, oder die Fotos sind schwierig in Kontext zu setzen, wenn es an Übersichtsaufnahmen und Aufnahmedatum fehlt. Seit digitale Kameras die analoge Fotografie abgelöst haben, ist die Menge an Foto und deren Verfügbarkeit stark gewachsen (Zahlen zu Flickr: Ref. Michel). Das ist nach E. Gersbach ¹ im Sinne einer zeitlich und räumlich lückenlosen Dokumentation. Doch es führt möglicherweise auch zu einer grossen Menge an wenig informativen Fotos, die insgesamt zwar schneller und einfacher gemacht worden sind, aber letztlich weniger aussagekräftig sind als weniger dafür bessere Fotos. Gute Fotos zu machen, daraus eine Auswahl zu treffen und diese mit der restlichen Dokumentation in Kontext zu setzen, kann ein beachtlicher Aufwand sein. Automatisierte Unterstützung beim Erfassen und Auswerten könnte diesen Prozess deutlich effizienter machen.

1.2.2 Zeichnungsdokumentation

Zu Zeichnungen schreibt der ADB in seinem Handbuch Ref. des Kantons Bern ????: "Man kann nur zeichnen was man versteht." Zeichnerische Dokumentation generalisiert, hebt Wichtiges hervor und lässt Unwichtiges weg. Für die Unterscheidung zwischen Wichtig und Unwichtig ist eine Interpretation erforderlich. Dies führt dazu, dass das Erstellen der Dokumentation vor Ort mehr Zeit erfordert da der Zeichner zu einer Interpretation gezwungen ist. Somit enthält eine Zeichnung nicht nur die Abbildung eines Befundes, sondern auch eine Interpretation dazu. Dieser reichere Informationsgehalt ist zwar für die spätere Interpretation sehr nützlich, stellt aber auch eine Verfälschung der realen Befundsituation dar.

1.2.3 Beschrieb

Fotos und Zeichnungen enthalten in erster Linie visuelle Informationen. Weitere wichtige qualitative Merkmale, etwa Materialien und Beschaffenheit, werden in Text festgehalten.

1.3 Fehlende Dimension

Fotos und Skizzen sind zweidimensionale (2D) Beschreibungen einer dreidimensionalen (3D) Realität. Es ist eine Projektion nötig, die um eine Dimension reduziert. Fotografie verwendet naturgemäss eine perspektivische Projektion (Zentralprojektion), für Skizzen hingegen kann auch eine orthographische Projektion (Parallelprojektion) verwendet werden. In jedem Fall geht eine ganze Dimension an Informationen verloren und muss mittels Abbildungen verschiedener Perspektiven vom Betrachter rekonstruiert werden. Dies erschwert die Interpretation dieser Form von Dokumentation und bedingt eine gute Wahl der Perspektive beim Erstellen der Abbildungen. Soweit wird die 3D Realität

¹Ref. Gersbach 1998

mittels verschiedener Projektionen und Techniken auf zwei Dimensionen abgebildet und im Kopf des Archäologen wieder in 3D rekonstruiert. Deutlich einfacher und intuitiver für den Betrachter ist es die 3D Struktur direkt abzubilden, zu speichern und zu betrachten.

Kapitel 2

Motivation

Die Idee 3D Strukturen in drei Dimensionen zu Erfassen und Darzustellen ist naheliegend, bedingt aber Aufnahmegeräte und eine Datenrepräsentation, die 3D Inhalte unterstützen. Dazu kommen neben aufwändigen Miniaturen nur computergestützte Verfahren in Frage.

2.1 Ziel dieser Arbeit

In dieser Arbeit werden Verfahren zur 3D Dokumentation präsentiert und deren technischen *Möglichkeiten* und *Nützlichkeit* für die Archäologie diskutiert. Insbesondere wird *Structure from Motion* (SfM, siehe Unterabschnitt 5.1.1) als einfaches und günstiges Verfahren zum Erstellen von 3D Modellen betrachtet und mit anderen Methoden verglichen. Anhand einiger Fallstudien soll die Möglichkeit der Integration in bestehende Grabungs- und Dokumentationspraxis und deren Vor- und Nachteile überprüft werden. Die Hauptpunkte sind dabei:

- *Mehrwert* der 3D Dokumentation gegenüber der 2D Dokumentation
- *Aufwand* zum Erstellen eines 3D Modells
- *Qualität* und Fehler eines gewonnen Modells
- *Integration* anderer Dokumentationen, insbesondere GIS-Daten

2.2 Theoretischer Ansatz

Einer Diskussion aufgrund praktischer Resultat muss eine theoretische Reflexion der Möglichkeiten und Präzisierung der Fragestellung vorangehen. die Motivation hinter der Nutzung von SfM in der Archäologie ist eine Verbesserung der Dokumentation. Es muss allem voran erst

2.2.1 Mehrwert

Der Mehrwert einer 3D Rekonstruktion hängt in erster Linie von dessen Qualität ab, je exakter das Modell, desto mehr Informationen sind darin dokumentiert.

Wenig detaillierte Modell visualisieren geometrischen Zusammenhänge, Dimension, Orientierung und grob die farblichen Unterschiede innerhalb einer Grabung. Siehe [TODO:Bild]. Die räumliche Darstellung vereinfacht es sich einen Überblick zu verschaffen und weitere Fragmente der Dokumentation zueinander in Bezug zu setzen. Zudem lassen sich 3D Modell gut für Öffentlichkeitsarbeit verwenden, da sie auch dem ungeübten Betrachter einfach und intuitiv die Situation aufzeigen.

Bei höherer Qualität der Rekonstruktion sind auch Details wie Mauerfugen und kleinere Artefakte zu sehen. Siehe [TODO:Bild]. Als Dokumentation, im Sinne vom Erfassen möglichst vieler und genauer Informationen, ist dies eine sehr kompakte und praktische Format, da es neben den visuellen Informationen einer Fotografie auch die metrischen Informationen eines Planes und die geometrische Struktur mehrerer Skizzen vereint. Die Schwierigkeit ist dabei, dass der Detailgrad nicht frei bestimmt werden kann, sondern von der Qualität der Eingabebilder abhängt.

2.2.2 Aufwand

2.2.3 Qualität

2.2.4 Integration

2.3 DRONARCH

Als technische Grundlage für die Fallstudien dient die Software *DRONARCH* Ref. Scheuing , die im Rahmen dieser Arbeit geschrieben wurde und das SfM Verfahren verwendet. Im Gegensatz zu bestehenden Publikationen, die sich mit SfM in der Archäologie beschäftigen Ref. Galeazzi u.a. 2013, VERHOEVEN u.a. 2012, Verhoeven 2011, Briese u.a. 2012, Reu u.a. 2013, Kawae u.a. 2013, Plets u.a. 2012 , verwendet und publiziert *DRONARCH* nur Open Source Software und will ein Werkzeug bieten mit wenig Geld und Zeitaufwand 3D Modell für den archäologischen Einsatz zu erstellen.

Kapitel 3

Aktueller Forschungsstand

Unter den Sammelbegriffen *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (CAA) und *Computational oder Digital Archaeology* haben verschiedene Verfahren aus der Informatik, insbesondere der Geoinformationssysteme (GIS), Computer Vision und Photography, Anwendung in der Archäologie gefunden. Man experimentiert mit automatischer Auswertung von Luft- und Satellitenbildern und verwendet GIS zur Lokalisierung und Registrierung von Fundorten Ref. Bevan und Lake 2013 , arbeitet mit unbemannten Luftfahrzeugen und Wärmebildkameras Ref. Casana u.a. 2014 und verwendet Helikites für hoch aufgelöste Luftaufnahmen Ref. VERHOEVEN u.a. 2012 . Die primäre Motivation dieser Forschung ist insgesamt eine exaktere und schnellere Dokumentation und effektivere Prospektion zu erreichen.

3.1 3D Scans

Durch die Entwicklung von Verfahren aus der Computer Vision Forschung, ist es möglich auf zahlreiche Arten und zerstörungsfrei 3D Scans von Objekten zu erstellen.

3.1.1 Laser Scanner

Mit Laser Scannern kann ein sehr präzises Modell eines Objektes, oder auch einer ganzen Grabung gemacht werden. Galeazzi et al. Ref. Galeazzi u.a. 2013 testen dieses Verfahren in Höhlen und im Wald und beschreiben einen grossen Aufwand beim Installieren und Betrieben des verwendeten Scanners. Die Rechenzeit am Computer beträgt mehrere Stunden pro Scan und generiert als Resultat ein sehr detailliertes Mesh (siehe Abschnitt A.2). Briese et al. Ref. Briese u.a. 2012 verwenden einen mobilen auf einem Auto montierten Scanner um das Heidentor in Carnuntum (Österreich) zu erfassen, ein Verfahren, das in den meisten Fällen schlecht eingesetzt werden kann. In beiden Fällen ist die Ausrüstung und die dazugehörige Software recht teuer und erfordert ein gewisses Mass an Fachwissen zur korrekten Bedienung.

3.1.2 Structure from Motion und Multiview Stereo

Durch die Verbindung der beiden Verfahren *Structure from Motion* (SfM) und *Multiview Stereo* (MvS) (siehe Unterabschnitt 5.1.1 und Unterabschnitt 5.1.2) kann aus unsortierten, nicht beschrifteten und nicht kalibrierten Bildern ohne grosse Nutzereingabe 3D Modelle erstellt werden Ref. Szeliski 2010, Agarwal u.a. 2011, Furukawa und Ponce 2010 . Diese Verfahren wurden schon verwendet um mit Bildern aus dem Internet Monumente und ganze Städte zu rekonstruieren Ref. Agarwal u.a. 2011, Furukawa u.a. 2010, Frahm u.a. 2010, Snavely u.a. 2006 .

De Reu et al. Ref. Reu u.a. 2013 verwendeten dieses Verfahren für die Dokumentation verschiedener Grabungen und konnten somit neben 3D Modellen auch Orthofoto (siehe Abschnitt A.3) und digitale Höhenmodelle (DTM, siehe Abschnitt A.4) erstellen. Sie beziffern den Fehler ihrer Modelle mit einem RM-SE (root-mean-square error) von meist weniger als 10cm.

Plets et al. Ref. Plets u.a. 2012 verwenden ebenfalls von Hand erstellte Fotos für die 3D Dokumentation von über 300 Petroglyphen im Altai Gebirge. Sie beschreiben das Verfahren als leicht anzuwenden und exakt und verwenden ebenfalls DTMs.

Aus der einzigen bekannten Videoaufnahme einer Kammer der grossen Pyramide des Königs Khufu, rekonstruieren Kawae et al. Ref. Kawae u.a. 2013 eine *Dense Point Cloud* (siehe Abschnitt A.1). Das verwendete Filmmaterial ist aus einer TV Produktion und zeigt meist den Moderator und das Innere der Kammer im Hintergrund. Trotz des ungeeigneten Bildmaterials gelingt es ihnen aufgrund des 3D Modells genaue Pläne der Kammer zu erstellen.

Verhoeven et al. Ref. Verhoeven 2011, VERHOEVEN u.a. 2012 arbeiten mit Luftaufnahmen als Grundlage und erstellen damit 3D Modelle, die sie mittels einzelner Vermessungspunkte orientieren und Skalieren. Durch diese Positionierung können die Modell mit bestehenden GIS in Zusammenhang gebracht werden.

Brise et al. Ref. Briese u.a. 2012 und Galeazzi et al. Ref. Galeazzi u.a. 2013 vergleichen SfM und MvS mit Laser Scannern und kommen zum Schluss, dass Ersteres durch seine Flexibilität, sein nahtloses Einfügen in bestehende Grabungspraxis und seine zeit- und kostengünstige Anwendung eine ernst zu nehmende Alternative zu Laser Scannern sind. Sie beschreiben aber auch Szenarien in denen SfM und MvS schlecht oder gar nicht funktionieren und beobachten eine ungleichmässige Qualität in den erreichten Modellen.

Kapitel 4

DRONARCH

Die Software DRONARCH bildet die Grundlage für die Untersuchung und Beantwortung der Fragestellung aus Abschnitt 2.1.

4.1 Entwicklung

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Entwicklung und Ideen hinter DRONARCH.

Drohnen Die Idee zur Verwendung von SfM in der Archäologie kam auf durch die Diskussion von Verwendung von Drohnen auf Grabungen. Luftbilder eignen sich recht gut für SfM Ref. Verhoeven 2011, VERHOEVEN u.a. 2012 und die verwendete Drohne Parrot AR 2.0 ist wendig genug um auch in Grabungszelten und Räumen zu fliegen. Die Verwendung von Drohnen hätte zudem den Vorteil, dass eine Grabung regelmässig, flächendeckend und automatisch erfasst werden könnte, was ansonsten ein grosser Aufwand ist. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die verwendete Steuerungssoftware nicht zuverlässig genug ist um die Drohne auf einer Grabung automatisch fliegen zu lassen und die Bildqualität nicht ausreicht. Deshalb befasst sich diese Arbeit noch nicht detaillierter mit automatisierter Bilderfassung.

Open-source In der Computer Vision Forschung wurde zum Glück verschiedene Software für SfM und MvS veröffentlicht, so dass nicht der ganze Prozess selbst implementiert werden musste. Damit DRONARCH open-source veröffentlicht werden kann, müssen die verwendeten Programme und Libraries auch open-source verfügbar sein und keine Nutzungsbedingungen enthalten, in denen das Eigentum der Bilder und Modelle an Dritte abgetreten werden. Aus dem zweiten Grund kommen Onlinedienste meist kaum in Frage. Die verwendete Software wird in Unterabschnitt 5.2.1 beschrieben.

Eigener Code Die Entwicklung des Codes war von Anfang an auf Flexibilität und Einfachheit ausgerichtet, zwei Eigenschaften die zentral für den erfolgreichen Einsatz in der Archäologie sind. Bilder können von Fotos, Videos oder ei-

ner Drohne eingelesen werden und der Prozess bis zu einer fertigen Pointcloud läuft ohne Nutzereingabe.

Tests Während der Entwicklung wurden zahlreiche Tests durchgeführt und einige davon werden in Abschnitt 6.2 ausgeführt.

Fallstudien Das Herzstück der Arbeit bilden die Fallstudien an archäologischem Material, die die Möglichkeiten und Schwächen von DRONARCH aufzeigen sollen. Sie werden in Abschnitt 6.2 ausführlich diskutiert.

4.2 Workflow

Damit sich DRONARCH möglichst nahtlos in den archäologischen Alltag integrieren lässt, wurde ein klarer Workflow definiert, der zwischen Feld- und Schreibtischarbeiten unterscheidet.

4.2.1 Bilder Erfassen

Als Eingabematerial kann DRONARCH Bilder und Videos verwenden. In Abschnitt B.1 finden sich Details zum Aufnehmen guter Bilder. Auch bereits vorhandenes Bildmaterial, das nicht für eine 3D Rekonstruktion gemacht wurde kann verwendet werden, wie in Unterabschnitt 6.2.1 anhand eines Beispiels diskutiert wird.

4.2.2 Verarbeitung

Die Berechnung des 3D Modells kann mehrere Stunden dauern und kann deshalb in der Regel schlecht vor Ort gemacht werden. Vor dem Start der Berechnung können verschiedene Parameter angepasst werden, die in Abschnitt B.2 beschrieben werden. Während der Berechnung ist keine weitere Nutzereingabe erforderlich.

4.2.3 Betrachtung

Das Modell kann in einem ply-kompatiblen 3D Viewer (bspw. MeshLab Ref. MeshLab) betrachtet und falls nötig manuell weiter bearbeitet werden. Das Modell kann skaliert und orientiert werden, damit es auch Koordinaten, Himmelsrichtung und Höhe anzeigen kann.

4.3 Evaluation mittels DRONARCH

DRONARCH soll dazu dienen die Fragen aus Abschnitt 2.1 zu beantworten. Eine ausführliche Diskussion dieser und der Methodik sie zu beantworten wird in diesem Abschnitt gegeben.

Kapitel 5

Implementierung

5.1 Computer Vision

5.1.1 Structure from Motion

5.1.2 Multiview Stereo

5.2 Implementierung

5.2.1 Verwendete Technologie

Kapitel 6

Resultate

6.1 Scans kleiner Objekte

6.2 Fallstudien

6.2.1 Test mit vorhandenen Bildern

Kapitel 7

Fazit

7.1 Schwierigkeiten

7.1.1 Unkontrolliert, Detailgrad wählen

7.2 Weitere Forschung

7.2.1 Automatisierte Bilderfassung

7.2.2 3D Druck

Anhang A

Begriffe

A.1 Point Cloud

Eine Point Cloud (Punktwolke) ist eine Menge von Punkten im 3D Raum. Die Punkte sind nicht miteinander verbunden, noch enthalten sie Informationen über Orientierung oder benachbarte Punkte. Die meisten 3D Scanner produzieren Point Clouds, die zu einem Mesh weiterverarbeitet werden können. Sind die Punkte dicht beieinander, spricht man von einer *dense* (dicht) Point Cloud. Ansonsten nennt man sie *sparse* (licht, locker).

A.2 Mesh

Verbindet man mehrere Punkte zu einer Fläche, meist zu Dreiecken, enthält man ein Mesh. Dies hat eine klare Orientierung und setzt Punkte in Verbindung mit ihren Nachbarn. Enthält ein Mesh keine Löcher, nennt man es watertight (wasserdicht).

A.3 Orthofoto

A.4 Digitales Höhenmodell

Anhang B

DRONARCH verwenden

B.1 Tipps zum Aufnehmen von Fotos

B.2 Parameter

Literaturverzeichnis

des Kantons Bern ????

A. D. des Kantons Bern, Handbuch ADB??? (????).

Michel **F. Michel** How many public photos are uploaded to Flickr every day, month, year?

(<https://www.flickr.com/photos/franckmichel/6855169886/> abgerufen am 13.01.2015)

Gersbach 1998

E. Gersbach, Ausgrabung heute: Methoden und Techniken der Feldgrabung (Wiss. Buchges., Darmstadt, Deutschland 1998).

Scheuing **N. Scheuing** DRONARCH on github.

(<https://github.com/DRONARCHers/DRONARCH> abgerufen am 30.12.2014)

Galeazzi u.a. 2013 **F. Galeazzi/ S. Lindgren/ H. Moyes** Comparison of Laser Scanning and Dense Stereo Matching Techniques in Diverse Environmental Conditions and Light Exposure (2013) ISBN 978-3-200-03676-5 2013 . (http://www.chnt.at/wp-content/uploads/Galeazzi_etal_2014.pdf abgerufen am 16.01.2015)

VERHOEVEN u.a. 2012 **G. VERHOEVEN/ D. Taelman/ F. Vermeulen**, COMPUTER VISION-BASED ORTHOPHOTO MAPPING OF COMPLEX ARCHAEOLOGICAL SITES: THE ANCIENT QUARRY OF PITARANHA (PORTUGAL-SPAIN). Archaeometry 54(6), 2012, 1114–1129. (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2012.00667.x> abgerufen am 16.01.2015)

Verhoeven 2011 **G. Verhoeven**, Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan. Archaeological Prospection 18(1), 2011, 67–73. (<http://dx.doi.org/10.1002/arp.399> abgerufen am 16.01.2015)

Briese u.a. 2012 **C. Briese/ G. Zach/ G. Verhoeven/ C. Ressel/ A. Ullrich/ N. Studnicka/ M. Doneus** Analysis of Mobile Laser Scanning Data and Multi-View Image Reconstruction (XXXIX-B5 2012) 2012 163–168 doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-163-2012 Talk: XXII ISPRS Congress, Melbourne; 2012-08-25 - 2012-09-01. (<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B5/163/2012/isprsarchives-XXXIX-B5-163-2012.pdf> abgerufen am 16.01.2015)

- Reu u.a. 2013 **J. D. Reu/ G. Plets/ G. Verhoeven/ P. D. Smedt/ M. Bats/ B. Cherretté/ W. D. Maeyer/ J. Deconynck/ D. Herremans/ P. Lalloo/ M. V. Meirvenne/ W. D. Clercq**, Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40(2), 2013, 1108 – 1121.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312003949> abgerufen am 16.01.2015)
- Kawae u.a. 2013 **Y. Kawae/ Y. Yasumuro/ I. Kanaya/ F. Chiba** 3D reconstruction of the "cave" of the great pyramid from video footage (2013), Bd. 1 2013 227–230 doi:10.1109/DigitalHeritage.2013.6743739.
(http://www.academia.edu/5230852/3D_Reconstruction_of_the_Cave_of_the_Great_Pyramid_from_Video_Footage abgerufen am 16.01.2015)
- Plets u.a. 2012 **G. Plets/ W. Gheyle/ G. Verhoeven/ J. D. Reu/ J. Bourgeois/ J. Verhegge/ B. Stichelbaut**, Three-dimensional recording of archaeological remains in the Altai Mountains . *Antiquity* 86(333), 2012, 884–897.
(<http://antiquity.ac.uk/ant/086/ant0860884.htm> abgerufen am 16.01.2015)
- Bevan und Lake 2013
A. Bevan/ M. Lake, Computational Approaches to Archaeological Spaces (Institut Of Archaeology, University College London 2013).
- Casana u.a. 2014 **J. Casana/ J. Kantner/ A. Wiewel/ J. Cothren**, Archaeological aerial thermography: a case study at the Chaco-era Blue J community, New Mexico. *Journal of Archaeological Science* 45(0), 2014, 207–219.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440314000648> abgerufen am 16.01.2015)
- Szeliski 2010
R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications (Springer-Verlag New York, Inc., New York 2010
(<http://szeliski.org/Book/> abgerufen am 16.01.2015)).
- Agarwal u.a. 2011 **S. Agarwal/ Y. Furukawa/ N. Snavely/ I. Simon/ B. Curless/ S. M. Seitz/ R. Szeliski**, Building Rome in a Day. *Commun ACM* 54(10), 2011, 105–112.
(<http://doi.acm.org/10.1145/2001269.2001293> abgerufen am 16.01.2015)
- Furukawa und Ponce 2010 **Y. Furukawa/ J. Ponce**, Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32(8), 2010, 1362–1376.
(<http://www.cse.wustl.edu/~furukawa/papers/pami08a.pdf> abgerufen am 16.01.2015)
- Furukawa u.a. 2010 **Y. Furukawa/ B. Curless/ S. M. Seitz/ R. Szeliski** Towards Internet-scale Multi-view Stereo (2010) 2010 .
(<http://grail.cs.washington.edu/pub/papers/furukawa2010tim.pdf> abgerufen am 16.01.2015)

- Frahm u.a. 2010 **J.-M. Frahm/ P. Fite-Georgel/ D. Gallup/ T. Johnson/ R. Raguram/ C. Wu/ Y. hung Jen/ E. Dunn/ S. Lazebnik/ M. Pollefeys** Building Rome on a Cloudless Day 2010.
(http://web.engr.illinois.edu/~slazebni/publications/eccv10_rome.pdf abgerufen am 16.01.2015)
- Snaveley u.a. 2006 **N. Snaveley/ S. M. Seitz/ R. Szeliski** Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D (ACM, New York, NY, USA 2006), SIGGRAPH '06 ISBN 1-59593-364-6 2006 835–846 doi:10.1145/1179352.1141964.
(<http://doi.acm.org/10.1145/1179352.1141964> abgerufen am 16.01.2015)
- Wu u.a. 2011 **C. Wu/ S. Agarwal/ B. Curless/ S. M. Seitz** Multicore bundle adjustment (IEEE 2011) 2011 3057–3064.
(<http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/> abgerufen am 16.01.2015)
- Snaveley **N. Snaveley** Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections.
(<http://www.cs.cornell.edu/~snaveley/bundler/> abgerufen am 08.01.2015)
- Furukawa **Y. Furukawa** Clustering Views for Multi-view Stereo (CMVS).
(<http://www.di.ens.fr/cmvs/> abgerufen am 08.01.2015)
- Furukawa und Ponce **Y. Furukawa/ J. Ponce** Patch-based Multi-view Stereo Software (PMVS - Version 2).
(<http://www.di.ens.fr/cmvs/> abgerufen am 08.01.2015)
- Klein und Murray 2007 **G. Klein/ D. Murray** Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces (Nara, Japan 2007) 2007 .
(<http://www.robots.ox.ac.uk/~gk/publications/KleinMurray2007ISMAR.pdf> abgerufen am 16.01.2015)
- Engel u.a. 2014 **J. Engel/ J. Sturm/ D. Cremers,** Scale-Aware Navigation of a Low-Cost Quadrocopter with a Monocular Camera. Robotics and Autonomous Systems (RAS) 62(11), 2014, 1646–1656.
(http://vision.in.tum.de/_media/spezial/bib/engel14ras.pdf abgerufen am 16.01.2015)
- Alvarez u.a. 2014 **H. Alvarez/ L. Paz/ J. Sturm/ D. Cremers** Collision Avoidance for Quadrotors with a Monocular Camera (2014) 2014 .
(https://vision.in.tum.de/_media/spezial/bib/alvarez14iser.pdf abgerufen am 16.01.2015)
- MeshLab **MeshLab** MeshLab.
(<http://meshlab.sourceforge.net/> abgerufen am 02.01.2015)
- Dellepiane u.a. 2013 **M. Dellepiane/ N. Dell Unto/ M. Callieri/ S. Lindgren/ R. Scopigno,** Archeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques. Journal of Cultural Heritage 14(3), 2013, 201–210.
(<http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2013/DDCLS13> abgerufen am 16.01.2015)