

DRONARCH

Digital Reconstruction Of Natural Environment and Archaeological and
Cultural Heritage using Structure from Motion

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 Fragestellung | 3 |
| 2.1 Ziel dieser Arbeit | 3 |
| 2.2 Kriterien | 3 |
| 2.2.1 Mehrwert | 3 |
| 2.2.2 Aufwand | 4 |
| 2.2.3 Qualität | 4 |
| 2.2.4 Integration | 5 |
| 2.3 DRONARCH | 5 |
| 3 Aktueller Forschungsstand | 6 |
| 3.1 3D Scans | 6 |
| 4 DRONARCH | 8 |
| 4.1 Entwicklung | 8 |
| 4.2 Workflow | 9 |
| 4.3 Computer Vision | 9 |
| 4.3.1 Structure from Motion | 9 |
| 4.3.2 Multiview Stereo | 10 |
| 4.4 Implementierung | 10 |
| 5 Resultate | 12 |
| 5.1 Fallstudie | 12 |
| 5.1.1 Gallorömisches Theater Bern Engehalbinsel | 12 |
| 5.2 Scans kleiner Objekte | 14 |
| 6 Fazit | 16 |
| 6.1 Auswertung | 16 |
| 6.2 Weitere Forschung | 17 |
| A Begriffe | 19 |
| A.1 Point Cloud | 19 |
| A.2 Mesh | 19 |
| A.3 Orthofoto | 19 |
| A.4 Digitales Höhenmodell | 19 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| B Agisoft PhotoScan | 21 |
| List of Figures | 24 |
| Bibliography | 24 |

Kapitel 1

Einleitung

Ziel der Archäologie ist das Bewahren 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 vielen 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 Abwagen des Nutzen-Kosten Verhältnisses nötig ist. Ist es etwa sinnvoll Tonnen von Dachziegeln zu reinigen, fotografieren, zeichnen und archivieren, oder reichen einige repräsentative Exemplare? Idealerweise sollten aber *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."¹.

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

¹Archäologischer Dienst des Kantons Bern

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 gewachsen². Das ist 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 Zeichnungsdocumentation

Zu Zeichnungen schreibt der ADB in seinem Handbuch ³: "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 viel Zeit erfordert. 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 verwendet man oft auch eine orthographische Projektion (Parallelprojektion). 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 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.

²Der online Bilderdienst Flickr kann als Referenz betrachtet werden: Michel 2014

³Archäologischer Dienst des Kantons Bern

Kapitel 2

Fragestellung

Die Idee 3D Strukturen in drei Dimensionen zu erfassen und darzustellen ist naheliegend, bedingt aber Aufnahmegeräte und 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*¹ (SfM) als einfaches und günstiges Verfahren zum Erstellen von 3D Modellen betrachtet und mit anderen Methoden verglichen. Anhand einer Fallstudie 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 gewonnenen Modells
- *Integration* anderer Dokumentationen, insbesondere GIS-Daten

2.2 Kriterien

Einer Diskussion aufgrund praktischer Resultat muss eine theoretische Reflexion der Möglichkeiten und Präzisierung der Fragestellung und der Kriterien zur Auswertung vorangehen.

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 Modelle visualisieren geometrischen Zusammenhänge, Dimension, Orientierung und grob die farblichen Unterschiede innerhalb einer Grabung. Siehe [TODO:Bild]. Die räumliche Darstellung vereinfacht es sich

¹Siehe Unterabschnitt 4.3.1

einen Überblick zu verschaffen und weitere Fragmente der Dokumentation zueinander in Bezug zu setzen. Für Öffentlichkeitsarbeit lassen sich 3D Modelle gut 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. Als Dokumentation, im Sinne vom Erfassen möglichst vieler und genauer Informationen, ist dies ein sehr kompaktes und praktisches Format, da es neben den visuellen Informationen einer Fotografie auch die metrischen Informationen eines Planes und die geometrische Struktur mehrerer Skizzen vereint.

2.2.2 Aufwand

Der zeitliche Aufwand besteht zum Einen in einem aktiven Aufwand, das Aufnehmen der Fotos, das Starten der Software und eventuelle Nachbearbeitungen. Zum Andern besteht der passive Aufwand aus der Zeit, die zur Berechnung des Modells benötigt wird und keine Nutzerinteraktion erfordert.

Der materielle Aufwand beschränkt sich auf eine Kamera und einen Computer. An den Computer sind keine besonderen Voraussetzungen gestellt, aber die Berechnung kann durch bessere Hardware stark beschleunigt werden.

2.2.3 Qualität

Dabei ist in erster Linie der Fehler oder die Korrektheit des Modells interessant. Die Korrektheit lässt sich nicht schlüssig beweisen, da dazu ein korrektes Referenzmodell existieren müsste. Stattdessen gibt es verschiedene Methoden den Fehler zu schätzen.

Referenzpunkte

Bevor die Fotos gemacht werden, misst man Referenzpunkte ein und markiert diese. Im fertigen Modell sind diese Punkte erkennbar und dienen einerseits zum Skalieren, Orientieren und Positionieren des Modells und andererseits zum Berechnen des Fehlers. Die Abweichung kann dann für jeden Punkt und für das gesamte Modell berechnet werden.

Verhoeven u.a.² verwenden dazu auf den Fels aufgemalte Markierungen, die auf den Luftaufnahmen zu erkennen sind und berechnen daraus den RMSE (Root Mean Square Error).

Vergleich mit anderen Methoden

Zusätzlich zum durch SfM erstellten Modell, wird mittels einer anderen Methode ein zweites Modell erstellt, das als Referent dient. Dabei ist a priori nicht klar welches Modell der Realität besser entspricht, es ist also kein wirklicher Vergleich mit der Realität.

Galeazzi u.a.³ verglichen Laser Scans mit MvS. Laser Scans sind etabliert und bekannt für eine hohe Genauigkeit und eignet sich deshalb sehr gut als Referenz.

Eine 2D Projektion des Modelles kann ganz einfach mit einem bestehenden Plan verglichen werden, was ohne grossen Aufwand mit einem Grafikbearbeitungsprogramm möglich ist.

²Verhoeven u.a. 2012

³Galeazzi u.a. 2013

2.2.4 Integration

Die Verbindung des 3D Modells und der bestehenden Dokumentation ist hauptsächlich eine Frage des Aufwandes während der manuellen Nachbearbeitung. Mit entsprechender Software kann das Modell mit Koordinaten aus GIS versehen oder 2D Ansichten aus dem Modell extrahiert werden.

Dellepiane u.a. schreiben dazu: "This method [SfM und MvS], if properly combined with other technologies such as Total Station or GPS (GNSS), can generate very powerful spatio-temporal information."⁴

2.3 DRONARCH

Als technische Grundlage für die Fallstudien dient die Software DRONARCH⁵, die im Rahmen dieser Arbeit geschrieben wurde und das SfM Verfahren verwendet. Im Gegensatz zu bestehenden Publikationen, die sich mit SfM in der Archäologie beschäftigen⁶, 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.

⁴Dellepiane u.a. 2013

⁵Scheuing 2015

⁶Galeazzi 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

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 Fundorten¹, arbeitet mit unbemannten Luftfahrzeugen und Wärmebildkameras² und verwendet Helikites für hoch aufgelöste Luftaufnahmen³. Die primäre Motivation dieser Forschung ist insgesamt eine exaktere und schnellere Dokumentation und eine umfänglichere Prospektion zu erreichen.

3.1 3D Scans

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

Laser Scanner Mit Laser Scannern kann ein sehr präzises Modell eines Objektes, oder auch einer ganzen Grabung gemacht werden. Galeazzi u.a.⁴ testen dieses Verfahren in Höhlen und im Wald und beschreiben einen grossen Aufwand beim Installieren und Betreiben des verwendeten Scanners. Die Rechenzeit am Computer beträgt mehrere Stunden pro Scan und generiert als Resultat ein sehr detailliertes Mesh⁵. Briese u.a.⁶ 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 teuer und erfordert ein gewisses Mass an Fachwissen zur korrekten Bedienung.

Structure from Motion und Multiview Stereo Durch die Verbindung der beiden Verfahren *Structure from Motion*⁷ (SfM) und *Multiview Stereo*⁸ (MvS)

¹Bevan und Lake 2013

²Casana u.a. 2014

³Verhoeven u.a. 2012

⁴Galeazzi u.a. 2013

⁵Siehe Abbildung B.2

⁶Briese u.a. 2012

⁷Siehe Unterabschnitt 4.3.1

⁸Siehe Unterabschnitt 4.3.2

können aus unsortierten, nicht beschrifteten und nicht kalibrierten Bildern ohne grosse Nutzereingabe 3D Modelle erstellt werden⁹. Diese Verfahren wurden schon verwendet um mit Bildern aus dem Internet Monamente und ganze Städte zu rekonstruieren¹⁰.

De Reu u.a.¹¹ verwendeten dieses Verfahren für die Dokumentation verschiedener Grabungen und konnten somit neben 3D Modellen auch Orthofoto¹² und digitale Höhenmodelle¹³ (DTM) erstellen. Sie beziffern den Fehler ihrer Modelle mit einem RMSE (root-mean-square error) von meist weniger als 10cm.

Plets u.a.¹⁴ 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 veröffentlichten Videoaufnahme einer Kammer der grossen Pyramide des Königs Khufu, rekonstruieren Kawae u.a.¹⁵ eine *Dense Point Cloud*¹⁶. 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 u.a.¹⁷ 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 u.a.¹⁸ und Galeazzi u.a.¹⁹ 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.

⁹Szeliski 2010, Agarwal u.a. 2011, Furukawa und Ponce 2010

¹⁰Agarwal u.a. 2011, Furukawa u.a. 2010, Snavely u.a. 2006

¹¹Reu u.a. 2013

¹²Siehe Abschnitt A.3

¹³Siehe Abschnitt A.4

¹⁴Plets u.a. 2012

¹⁵Kawae u.a. 2013

¹⁶Siehe Abschnitt A.1

¹⁷Verhoeven 2011, Verhoeven u.a. 2012

¹⁸Briese u.a. 2012

¹⁹Galeazzi u.a. 2013

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 durch die Diskussion von Verwendung von Drohnen auf Grabungen auf. Luftbilder eignen sich recht gut für SfM¹ 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 manuell 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 verschiene 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 verwendeten Libraries werden in Abschnitt 4.4 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 einer Drohne eingelesen werden und der Prozess bis zu einer fertigen Point Cloud läuft ohne Nutzereingabe.

¹Verhoeven 2011, Verhoeven u.a. 2012

Tests Während der Entwicklung wurden zahlreiche Tests durchgeführt und einige davon werden in Abschnitt 5.1 ausgeführt.

Fallstudie Das Herzstück der Arbeit bildet die Fallstudie an archäologischem Material, die die Möglichkeiten und Schwächen von DRONARCH aufzeigen sollen. Sie wird in Abschnitt 5.1 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.

Bilder Erfassen Als Eingabematerial kann DRONARCH Bilder und Videos verwenden. Auch bereits vorhandenes Bildmaterial, das nicht für eine 3D Rekonstruktion gemacht wurde, kann verwendet werden.

Verarbeitung Das Berechnung des 3D Modelles kann mehrere Stunden dauern und deshalb in der Regel schlecht vor Ort gemacht werden. Vor dem Start der Berechnung können verschiedene Parameter angepasst werden. Während der Berechnung ist keine weitere Nutzereingabe erforderlich.

Betrachtung Das Modell kann in einem ply-kompatiblen 3D Viewer² betrachtet und falls nötig manuell weiter bearbeitet, etwa skaliert und orientiert, werden, damit Koordinaten, Himmelsrichtung und Höhe erkennbar ist.

4.3 Computer Vision

Die in DRONARCH verwendeten Verfahren kommen aus der *Computer Vision*, einer Disziplin der Informatik, die sich mit der automatischen Verarbeitung visueller Informationen beschäftigt. Dazu gehören auch *Structure from Motion* und *Multiview Stereo*.

Der folgende Absatz zeige grob deren Funktionsweise auf.

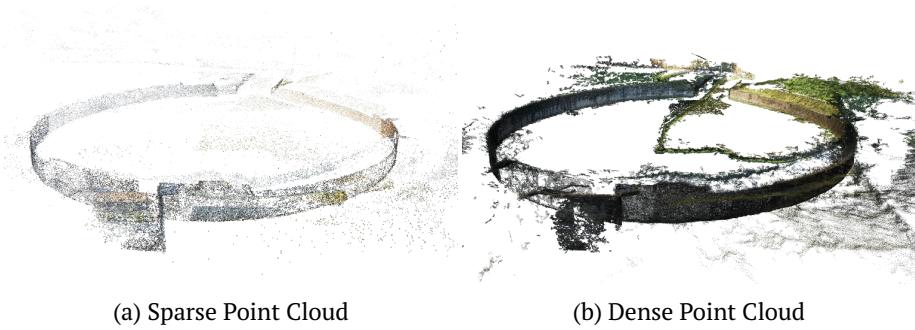
4.3.1 Structure from Motion

SfM berechnet aufgrund mehrerer Bilder des gleichen Objekts ein grobes 3D Modell davon und die relativen Kamerapositionen. Es wird gleichzeitig die 3D Struktur des Objektes (Structure) errechnet und von wo und mit welcher Orientierung und Brennweite die Fotos gemacht wurden (Motion). Die gewonnene Point Cloud ist noch nicht dicht genug³, da sie nur auf wenigen optisch auffälligen Punkten basiert und sie weisst einen nicht bekannten Massstab auf.

Der grosse Vorteil von SfM ist, dass die Eingabebilder kaum Einschränkungen unterliegen. Sie müssen weder kalibriert sein, noch die selben Kameraeinstellungen wie Brennweite und Belichtungszeit verwenden, können sogar von verschiedenen Kameras stammen.

²bspw. MeshLab (ISTI und CNR 2015)

³Siehe Abbildung 4.1a



(a) Sparse Point Cloud

(b) Dense Point Cloud

Abbildung 4.1: Das gallorömische Theater Engehalbinsel als sparse und dense Point Cloud

Die Rekonstruktion durch SfM kann auch scheitern. Das wird entweder während der Berechnung automatisch bemerkt, oder erst beim Betrachten des Modells. Um das zu verhindern ist die Wahl der ersten zwei Bilder wichtig, die für das Berechnen einer ersten Schätzung des Objektes verwendet werden.

4.3.2 Multiview Stereo

Durch SfM ist jede Kameraposition bekannt und dadurch wie zwei Bilder zueinander stehen. Diese Information nutzt man für eine Triangulation jedes Pixels. Dadurch entsteht eine sehr dichte Point Cloud⁴ und abhängig von den Einstellungen und der Auflösung der Fotos kann ein sehr detailreiches Modell erstellt werden. Dieser Schritt kann sehr lange dauern und benötigt viel Arbeitsspeicher, wenn ein detailreiches Modell erstellt werden soll.

4.4 Implementierung

Da DRONARCH ein open source Projekt ist und auf solchen aufbaut, darf eine kurze Aufführung der verwendeten Programme und Libraries nicht fehlen. Der Source Code ist auf github verfügbar⁵.

Python Die Programmiersprache Python⁶ ist wegen seiner Einfachheit und der grossen Menge an verfügbaren Libraries beliebt. In DRONARCH sind alle vorbereitenden Schritte und die Koordination der einzelnen Fragmente in Python geschrieben.

OpenCV OpenCV⁷ eine Sammlung von Computer Vision Algorithmen und bietet eine Schnittstelle für Python.

Bundler Die SfM Implementierung Bundler⁸ von Noah Snavely wurde für die Verarbeitung einer grossen Menge an Fotos aus dem Internet geschrieben.

⁴Siehe Abbildung 4.1b

⁵Scheuing 2015

⁶Python Software Foundation 2015

⁷OpenCV 2015

⁸Snavely 2015

Snavely u.a. verwenden Bundler unter anderem dafür Monamente⁹ oder ganze Städte¹⁰ aus Fotos aus dem Internet zu rekonstruieren.

PMVS und CMVS Die Kombination aus PMVS¹¹ und CMVS¹² ist für den MvS Schritt zuständig. Die Software stammt von Furukawa u.a.¹³ und wurde von ihnen für MvS mit unstrukturierten Bildern verwendet¹⁴.

⁹Snavely u.a. 2006

¹⁰Agarwal u.a. 2011

¹¹Furukawa und Ponce 2015

¹²Furukawa 2015

¹³Furukawa und Ponce 2010

¹⁴Furukawa u.a. 2010

Kapitel 5

Resultate

Eine Reihe an Versuchen sollte die Möglichkeiten und Grenzen von SfM und MvS Verfahren, insbesondere von DRONARCH aufzeigen. Sämtliche hier präsentierte Resultate wurden mit DRONARCH gemacht und PhotoScan¹ wurde zur Kontrolle der Ergebnisse verwendet, vor allem wenn eine Rekonstruktion misslang.

5.1 Fallstudie

Um die Anwendbarkeit der diskutierten Verfahren für die Archäologie zu erproben, musste ein Versuch an archäologischen Strukturen gemacht werden.

5.1.1 Gallorömisches Theater Bern Engehalbinsel

Durch seine klare und gut sichtbare oberirdische Struktur eignet sich das gallorömische Theater des Vicus Brenodurum auf der Engehalbinsel bei Bern gut für einen 3D Rekonstruktion mittels SfM.

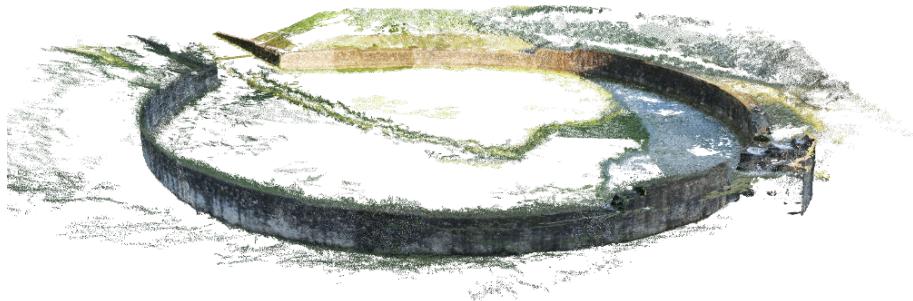
Aufgrund von Terra-Sigilata und Münzen, die während einer Grabung im Jahre 1956 gefunden wurden, geht man davon aus, dass die Erbauung des Theaters in die zweite Hälfte des 2.Jh. n.Chr. datiert. Die heute sichtbaren Mauern umfassen eine Fläche von etwa 35 auf 25 Meter und weist eine Höhe bis zu 1.5 Meter auf².

3D Modell

Die Fotos wurden mit einer Kompaktkamera und einer Auflösung von ca. 3000px auf 2000px von Hand und mit automatischer Einstellung in weniger als 10 Minuten Arbeit erfasst. DRONARCH benötigte knapp 10 Stunden für den SfM Schritt, mit dem eine Sparse Point Cloud erstellt wurde³. In weiteren 7 Stunden Rechenzeit wurde mittels MvS eine Point Cloud von 7 mio Punkten erstellt, die nach grober Bearbeitung auf 4 mio Punkte reduziert wurde⁴.



(a) Die Mauern weisen viele Punkte auf, die Fläche in der Mitte bleibt leer.



(b) Löcher auch an etwas verborgenen Stellen, wie der leicht eingesenkten Rasen oberhalb der Mauer.



(c) Detailansicht. Eine Ecke war auf keinem Foto sichtbar, es fehlen deshalb Punkte.

Abbildung 5.1: Dense Point Clouds des gallorömischen Theaters Engehalbinsel

Beobachtungen

Die Point Cloud ist an Stellen mit optisch auffälliger Struktur, etwa die Mauer selbst, sehr detailreich und exakt, wie in Abbildung 5.1a zu erkennen ist. In uniformen Gegenden, wie dem Rasen in der Mitte, sind fast keine Punkte vorhanden, was das Erstellen eines Meshs enorm erschwert.

Bei den Mauern ist zu beobachten, dass der Detailgrad nicht gleichmäßig ist. Stellen, die auf den Fotos mehr Details aufweisen, sind auch in der Rekonstruktion deutlich besser, wie der rechte teil der Mauer auf Abbildung 5.1c zeigt. Einige Stellen sind auf keinem Foto sichtbar, die Rekonstruktion schlägt dort komplett fehl.

Abbildung 5.2 zeigt einen Vergleich einer orthogonale Projektion des Modells mit einem Plan des Theaters. Er zeigt nur kleine Abweichungen auf, die eher auf die manuelle Orientierung und Positionierung der Bilder zurückzuführen ist als auf einen Fehler im Modell.

5.2 Scans kleiner Objekte

SfM erscheint auch attraktiv um einzelne kleine Objekte, wie Knochen oder Keramikfragmente, 3D zu erfassen und dokumentieren. In sieben Versuchen mit verschiedenen Objekten ist es allerdings weder mit DRONARCH noch mit PhotoScan⁵ gelungen eine vollständige Rekonstruktion zu machen. Deshalb kann das Verfahren auf kleine Objekte angewendet so nicht als brauchbare Alternative zu Laserscannern betrachtet werden.

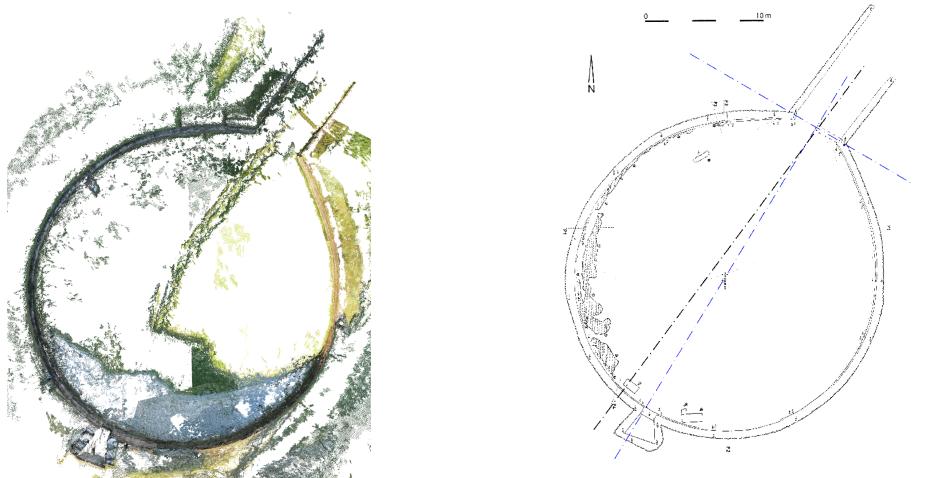
¹Siehe Anhang B

²Lawernce 2010

³Siehe Abbildung 4.1a

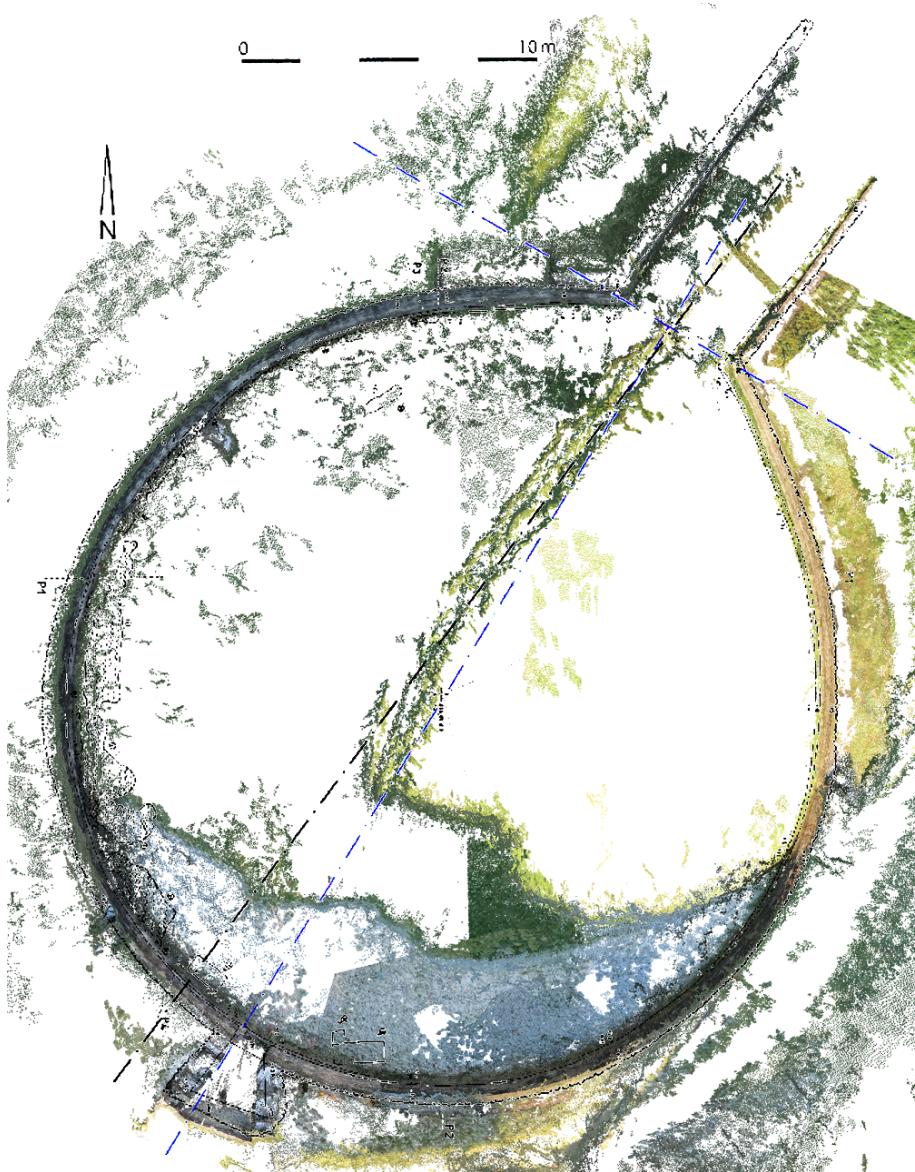
⁴Siehe Abbildung 4.1b

⁵Siehe Anhang B



(a) Orthofoto der Point Cloud

(b) Plan des Theaters aus
(Lawernce 2010)



(c) Überlagerung von Plan und Orthofoto. Die Abweichung ist unten links ersichtlich.

Abbildung 5.2: Überlagerung von Plan und Orthofoto.

Kapitel 6

Fazit

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 und die vorangehende Forschung, die in Kapitel 3 diskutiert wird, legen nahe, dass SfM und MvS Verfahren in der Archäologie ausgesprochen nützlich sind.

6.1 Auswertung

Ergebnissen aus Abschnitt 5.1 können nun mit der Fragestellung in Abschnitt 2.1 ausgewertet werden.

Mehrwert Das Modell ist trotz schlechten Aufnahmebedingungen gut genug um Details in der Mauer und die geometrische Form des Theaters gut zu erkennen. Durch die Löcher im Boden ist es für Öffentlichkeitsarbeit vermutlich nicht gut genug, gibt aber schon so dem ungeübten Auge eine gute Vorstellung der Situation. Erstrebenswert wäre eine gleichmässigere Verteilung der Punkte um damit ein Mesh bilden zu können.

Der Detailgrad reicht an den meisten Stellen um einzelne Steine der Mauer zu erkennen und damit um beispielsweise deren Grösse oder Farbe zu bestimmen.

Aufwand Das Aufnehmen der Fotos war in weniger als 20 Minuten getan und kann mit etwas Übung noch schneller vonstatten gehen, da für eine vergleichbare Qualität der Rekonstruktion auch die Hälfte der Bilder genügt hätten. Weniger Bilder verkürzen auch die Berechnungszeit von bis zu 20 Stunden drastisch, da die benötigte Zeit nicht linear, sondern stärker, zunimmt. Die lange Rechenzeit ist wenig problematisch, da die unbeaufsichtigt gemacht werden kann, sie führt aber zu einem Stromverbrauch von knapp 10KWh pro Rekonstruktion.

Qualität Die Überlagerung eines Orthofotos und Planes in Abbildung 5.2 war die einzige angewandte Fehlermessung im Rahmen dieser Arbeit und die Aussagekraft dieses Vergleichs ist beschränkt. Das Modell scheint demnach keine grossen Abweichung zu haben, die Geometrie stimmt gut überein. Einzelne abweichende Punkte können bei der Rekonstruktion durch anpassen von Parametern mehr oder weniger streng verworfen werden, was aber auch korrekte Punkte entfernen kann. Hier braucht es etwas Erfahrung um ein bestmögliches Resultat zu erhalten.

Integration Mit Hilfe eines Planes wurde ein Modell skaliert und orientiert¹. Diese fand aber wegen dem Plan als 2D Referenz nur in zwei Dimensionen statt. Eine korrekte Referenzierung müsste über vermessene Kontrollpunkte passieren. Die verwendete Software Meshlab² unterstützt diese Ansätze ohne zusätzliche Erweiterungen zu wenig, weitere Nachforschungen in diesem Punkt wären notwendig.

Schwierigkeiten Die Hauptschwierigkeit ist das Erstellen der Fotos, da nie klar ist, ob die Rekonstruktion mit den gemachten Bildern funktionieren wird, oder ob noch mehr Bilder benötigt werden. Auch hier wird Erfahrung helfen effizienter und sicherer arbeiten zu können.

Diese Unsicherheit ist ein wesentlicher Kritikpunkt an dem Verfahren, denn durch die langen Rechenzeit kann nicht vor Ort überprüft werden ob die Rekonstruktion gelingt. Dies ist eine starke Einschränkung für die Verwendung zu einer lückenlosen Dokumentation.

6.2 Weitere Forschung

Das Potential von 3D Scans, insbesondere von SfM, ist damit natürlich längst nicht ausgeschöpft. Dieser Ansatz zu einer effizienten exakten Dokumentationsweise und intuitiven natürlichen Darstellung bietet noch viele Möglichkeiten zur Verbesserung.

Verbesserte Visualisierung Snavley u.a. verwenden neben Point Clouds in ihrer Darstellung von Monumenten auch die originalen Fotos³. Dem Nutzer wird direkt in dem 3D Modell das Foto und dessen Position angezeigt. Damit werden Fotos direkt in das 3D Modell integriert und die Interpretation stark vereinfacht.

3D Druck Die Kantonsarchäologie Aargau hat von Vindonissa ein 3D Modell erstellt und dieses von einem 3D Drucker im Massstab 1:450 nachbauen lassen⁴. Das selbe Verfahren lässt sich auf beliebige 3D Modelle anwenden, so auch auf Meshes, die mit SfM erstellt wurden.

Automatisierte Bilderaufnahme DRONARCH wurde mit der Idee von automatischer Bilderaufnahme mittels Drohnen geboren und dieser Ansatz bietet viele Möglichkeiten. Mit Drohnen könnten die Fotos automatisch und periodisch erstellt werden und schwierig zugängliche Stellen problemlos erfasst werden. Das ein autonomes Navigieren auch mit günstigen Drohnen möglich ist wurde bereits gezeigt⁵, die verfügbare Implementierung davon hat sich aber noch als zu wenig robust herausgestellt.

Neben Drohnen könnten stationäre Kameras, die periodisch Fotos machen, eingesetzt werden.

¹Siehe Abbildung 5.2

²ISTI und CNR 2015

³Snavely u.a. 2006

⁴Flück 2010

⁵Klein und Murray 2007, Engel u.a. 2014, Alvarez u.a. 2014

Performance Verbessern Die in DRONARCH verwendete Software ist bei weitem nicht die schnellstmögliche und die Rechenzeit könnte durch Optimierungen verkürzt werden. Im Moment laufen viele Schritte nicht parallel und so könnte man etwa mit *Multicore Bundle Adjustment* Wu u.a.⁶ den SfM Teil parallelisieren.

⁶Wu u.a. 2011

Anhang A

Begriffe

A.1 Point Cloud

Eine Point Cloud (Punktwolke) ist eine Menge von Punkten im 3D Raum. Die Punkte sind weder 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). Siehe Abbildung 4.1.

A.2 Mesh

Verbindet man mehrere Punkte einer Point Cloud 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). Siehe Abbildung B.2.

A.3 Orthofoto

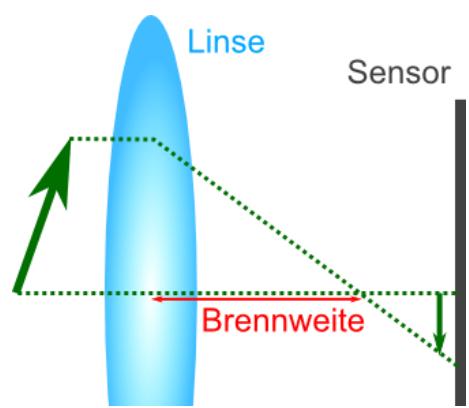
Fotos einer üblichen Kamera, die nach dem Prinzip einer Lochkamera funktionieren, projizieren alle Lichtstrahlen, die durch den Brennpunkt fallen, auf die Bildfläche. Man spricht von einer perspektivischen Projektion, siehe Abbildung A.1a.

Erstellt man einen Plan oder Aufriss, verwendet man nicht eine perspektivische Projektion, sondern eine orthographische Projektion, siehe Abbildung A.1b. Ein solches Bild kann durch Rektifizieren von normalen Fotos erreicht werden, erfordert aber meist manuelle Arbeit und kann zu Artefakten im entzerrten Bild führen.

Der Vorteil von Orthofotos ist, dass sie wie ein Plan verwendet werden oder als Vorlage für solche dienen können.

A.4 Digitales Höhenmodell

Ein digitales Höhenmodell versucht in einer 2D Darstellung die Information der fehlenden dritten Dimension darzustellen. Dazu können Höhenlinien oder auch Farben verwendet werden.



(a) Schematische Darstellung einer gewöhnlichen Kamera mit Linse. Perspektivische Projektion



(b) Schematische Darstellung eines Orthofotos

Abbildung A.1: Modelle der perspektivischen und orthogonalen Projektion

Anhang B

Agisoft PhotoScan

Das Programm PhotoScan von Agisoft¹ implementiert die selben Schritte wie DRONARCH und wurde in der Archäologie schon mehrfach verwendet und dokumentiert². Im Laufe dieser Arbeit wurde PhotoScan verwendet um die Resultate von DRONARCH zu verifizieren.

Anwendung Der Arbeitsfluss mit PhotoScan ist sehr einfach und ohne Hintergrundwissen gut zu verstehen. Die zur Verfügung gestellten Werkzeuge sind vollständig und funktionieren robust. Die Rechenzeit variiert nach gewählter Qualität stark und entspricht bei der höchsten Qualität etwa der von DRONARCH. Der Nutzer hat die Möglichkeit das Modell mit vermessenen Referenzpunkten zu orientieren und skalieren.

Vergleich mit DRONARCH Ein Vergleich der Resultate beider Programme zeigt eine deutlich gleichmässigere Verteilung der Punkte in der Point Cloud von PhotoScan, was es ermöglicht daraus ein Mesh zu generieren.

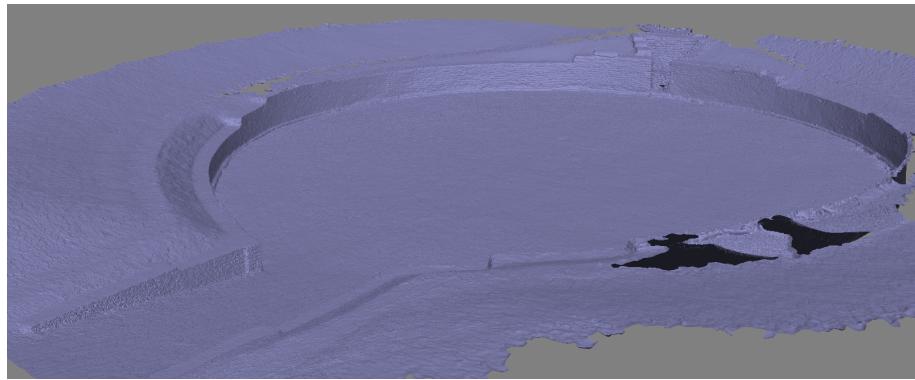
Resultate PhotoScan wurde mit den selben Fotos gestartet wie DRONARCH für den Versuch in Unterabschnitt 5.1.1 und hat in etwa 20 Stunden ein Mesh mit Texturen erstellt. Auch diese Rekonstruktion weist einige Lücken auf, aber nur dort, wo die Fotos den Bereich schlecht oder gar nicht abdecken. Das Modell kann als dichte Point Cloud dargestellt werden, als Mesh ohne oder mit Texturen, wie in Abbildung B.1 abgebildet.

¹Agisoft 2015

²Galeazzi u.a. 2013, Verhoeven u.a. 2012, Verhoeven 2011, Reu u.a. 2013, Plets u.a. 2012



(a) Die dichten Point Cloud weist wenige Lücken auf.

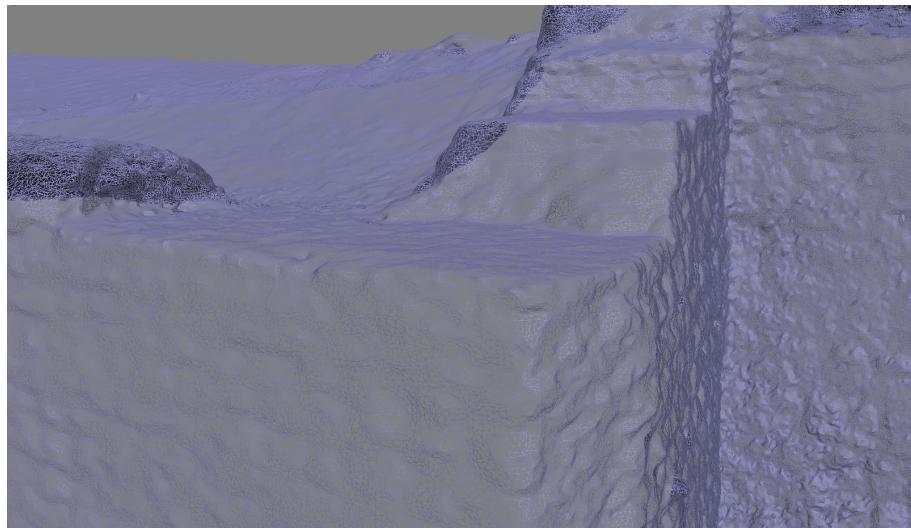


(b) Ohne Texturen sind die Oberflächenstrukturen des Meshs besser sichtbar.

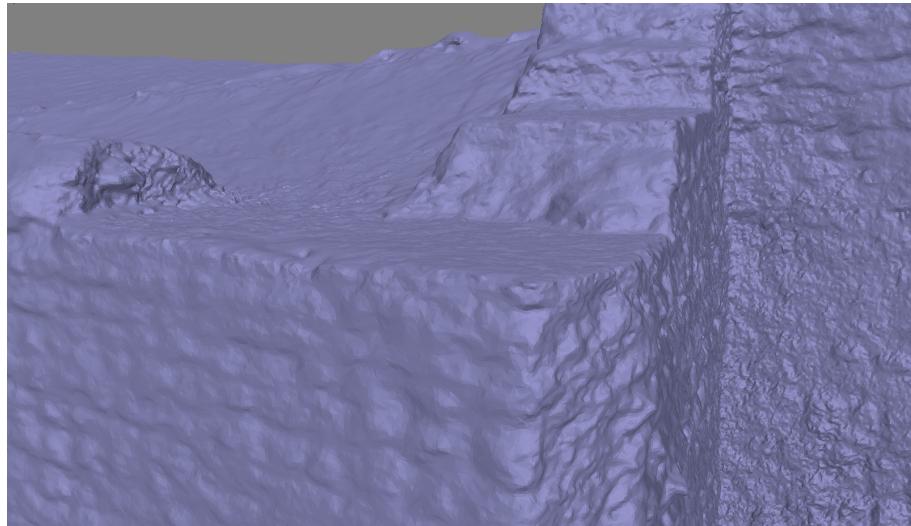


(c) Das texturierte Modell gibt den besten Eindruck, verdeckt aber auch geometrische Details.

Abbildung B.1: Gallorömisches Theater Enghalbinsel mit PhotoScan rekonstruiert.



(a) Mesh als Wireframe dargestellt



(b) Mesh gerendert mit virtueller Beleuchtung



(c) Mesh mit Texturen

Abbildung B.2: Gallorömisches Theater Engehalbinsel. Rekonstruktion mit PhotoScan.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Das gallorömische Theater Engehalbinsel als sparse und dense Point Cloud | 10 |
| 5.1 | Dense Point Clouds des gallorömischen Theaters Engehalbinsel | 13 |
| 5.2 | Überlagerung von Plan und Orthofoto. Plan aus (Lawernce 2010) | 15 |
| A.1 | Modelle der perspektivischen und orthogonalen Projektion . . . | 20 |
| B.1 | Gallorömisches Theater Engehalbinsel mit PhotoScan rekonstruiert | 22 |
| B.2 | Gallorömisches Theater Engehalbinsel. Rekonstruktion mit PhotoScan | 23 |

Literaturverzeichnis

Archäologischer Dienst des Kantons Bern

Archäologischer Dienst des Kantons Bern, Handbuch
ADB (Archäologischer Dienst des Kantons Bern).

Michel 2014 **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).

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)

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. 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013,
(http://www.chnt.at/wp-content/uploads/Galeazzi_et_al_2014.pdf abgerufen am 16.01.2015)

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)

Scheuing 2015 **N. Scheuing**, DRONARCH on github.

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

Verhoeven 2011 **G. Verhoeven**, Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. 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. Ressl/ A. Ullrich/ N. Studnicka/ M. Doneus**, Analysis of Mobile Laser Scanning Data and Multi-View Image Reconstruction. International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2012, 163–168.
(<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. Laloo/ 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. Digital Heritage International Congress Bd. 1 2013, 227–230.
(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 (Institute 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. CVPR 2010,
(<http://grail.cs.washington.edu/pub/papers/furukawa2010tim.pdf> abgerufen am 16.01.2015)

Snavely u.a. 2006 **N. Snavely/ S. M. Seitz/ R. Szeliski**, Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D. ACM SIGGRAPH 2006 Papers SIGGRAPH '06 2006, 835–846.

(<http://doi.acm.org/10.1145/1179352.1141964> abgerufen am 16.01.2015)

ISTI und CNR 2015 **ISTI/ CNR**, MeshLab.

(<http://meshlab.sourceforge.net/> abgerufen am 02.01.2015)

Python Software Foundation 2015 **Python Software Foundation**, Python programming language.

(<https://www.python.org/> abgerufen am 21.01.2015)

OpenCV 2015 **OpenCV**, Open Source Computer Vision.

(<http://opencv.org/> abgerufen am 21.01.2015)

Snavely 2015 **N. Snavely**, Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections.

(<http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/> abgerufen am 08.01.2015)

Furukawa und Ponce 2015 **Y. Furukawa/ J. Ponce**, Patch-based Multi-view Stereo Software (PMVS - Version 2).

(<http://www.di.ens.fr/cmvs/> abgerufen am 08.01.2015)

Furukawa 2015 **Y. Furukawa**, Clustering Views for Multi-view Stereo (CMVS).

(<http://www.di.ens.fr/cmvs/> abgerufen am 08.01.2015)

Lawernce 2010

A. Lawernce, Ein neuer Vorschlag zur Rekonstruktion des gallorömischen Theaters auf der Engehalbinsel bei Bern. Jahrbuch des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern 2010 (Archäologischer Dienst des Kantons Bern 2010).

Flück 2010 **M. Flück**, The printed Legionary Camp of Vindonissa. 15th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2010,

(<http://www.chnt.at/the-printed-legionary-camp-of-vindonissa/> abgerufen am 21.01.2015)

Klein und Murray 2007 **G. Klein/ D. Murray**, Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07) 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. Proc. of The 12th International Symposium on Experimental Robotics (ISER) 2014,

(https://vision.in.tum.de/_media/spezial/bib/alvarez14iser.pdf abgerufen am 16.01.2015)

Wu u.a. 2011 **C. Wu/ S. Agarwal/ B. Curless/ S. M. Seitz**, Multicore bundle adjustment. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2011, 3057–3064.

(<http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/> abgerufen am 16.01.2015)

Agisoft 2015 **Agisoft**, PhotoScan.

(<http://www.agisoft.com/> abgerufen am 22.01.2015)