

# 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Motivation</b>	<b>4</b>
2.1	Ziel dieser Arbeit . . . . .	4
2.2	Kriterien . . . . .	4
2.2.1	Mehrwert . . . . .	5
2.2.2	Aufwand . . . . .	5
2.2.3	Qualität . . . . .	5
2.2.4	Integration . . . . .	6
2.3	DRONARCH . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Aktueller Forschungsstand</b>	<b>7</b>
3.1	3D Scans . . . . .	7
3.1.1	Laser Scanner . . . . .	7
3.1.2	Structure from Motion und Multiview Stereo . . . . .	8
<b>4</b>	<b>DRONARCH</b>	<b>9</b>
4.1	Entwicklung . . . . .	9
4.2	Workflow . . . . .	10
4.2.1	Bilder Erfassen . . . . .	10
4.2.2	Verarbeitung . . . . .	10
4.2.3	Betrachtung . . . . .	10
4.3	Computer Vision . . . . .	10
4.3.1	Structure from Motion . . . . .	11
4.3.2	Multiview Stereo . . . . .	11
4.4	Implementierung . . . . .	11
4.4.1	Python . . . . .	11
4.4.2	OpenCV . . . . .	12
4.4.3	Bundler . . . . .	12
4.4.4	PMVS und CMVS . . . . .	12

<b>5 Resultate</b>	<b>13</b>
5.1 Fallstudien . . . . .	13
5.1.1 Gallorömisches Theater Bern Engehalbinsel . . . . .	13
5.1.2 Test mit vorhandenen Bildern . . . . .	14
5.2 Scans kleiner Objekte . . . . .	14
<b>6 Fazit</b>	<b>15</b>
6.1 Schwierigkeiten . . . . .	15
6.1.1 Unkontrolliert, Detailgrad wählen . . . . .	15
6.2 Weitere Forschung . . . . .	15
6.2.1 Fotos einbinden (Photo Tourism) . . . . .	15
6.2.2 3D Druck . . . . .	15
6.2.3 Automatisierte Bilderfassung . . . . .	15
6.2.4 Performance Verbessern . . . . .	16
<b>A Begriffe</b>	<b>17</b>
A.1 Point Cloud . . . . .	17
A.2 Mesh . . . . .	17
A.3 Orthofoto . . . . .	17
A.4 Digitales Höhenmodell . . . . .	18
<b>B DRONARCH verwenden</b>	<b>19</b>
B.1 Tipps zum Aufnehmen von Fotos . . . . .	19
B.2 Parameter . . . . .	19
<b>C Implementierung</b>	<b>20</b>
C.1 Computer Vision . . . . .	20
<b>D Vergleich mit Agisoft PhotoScan</b>	<b>21</b>
Bibliography . . . . .	22

# 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." <sup>1</sup>.

#### 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,

---

<sup>1</sup>Archäologischer Dienst des Kantons Bern

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: <sup>2</sup>). Das ist nach E. Gersbach <sup>3</sup> 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 <sup>4</sup>: "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

---

<sup>2</sup>Michel 2014

<sup>3</sup>Gersbach 1998

<sup>4</sup>Archäologischer Dienst des Kantons Bern

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 4.3.1) 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 Kriterien

Einer Diskussion aufgrund praktischer Resultat muss eine theoretische Reflexion der Möglichkeiten und Präzisierung der Fragestellung und der Kriterien zur Auswertung vorangehen. Die Motivation für die 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 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 Rechenzeit, die ohne Nutzereingabe benötigt wird zum berechnen des Modells.

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.<sup>1</sup> verwenden dazu auf den Fels aufgemalte Markierungen, die auf den Luftaufnahmen zu erkennen sind und berechnen daraus den RMSE (Root Mean Square Error).

---

<sup>1</sup>Verhoeven u.a. 2012



## 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.<sup>2</sup> verglichen Laser Scans und MvS. Laser Scans sind etabliert und bekannt für eine hohe Genauigkeit und eignet sich deshalb sehr gut als Referenz.

### 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." <sup>3</sup>

## 2.3 DRONARCH

Als technische Grundlage für die Fallstudien dient die Software DRONARCH <sup>4</sup>, 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 <sup>5</sup>, 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.

---

<sup>2</sup>Galeazzi u.a. 2013

<sup>3</sup>Dellepiane u.a. 2013

<sup>4</sup>Scheuing 2015

<sup>5</sup>Galeazzi u.a. 2013, Verhoeven u.a. 2012, Verhoeven 2011, Briesse 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 Fundorten<sup>1</sup>, arbeitet mit unbemannten Luftfahrzeugen und Wärmebildkameras<sup>2</sup> und verwendet Helikites für hoch aufgelöste Luftaufnahmen<sup>3</sup>. 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 u.a.<sup>4</sup> 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 u.a.<sup>5</sup> 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

---

<sup>1</sup>Bevan und Lake 2013

<sup>2</sup>Casana u.a. 2014

<sup>3</sup>Verhoeven u.a. 2012

<sup>4</sup>Galeazzi u.a. 2013

<sup>5</sup>Briese u.a. 2012

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 4.3.1 und Unterabschnitt 4.3.2) kann aus unsortierten, nicht beschrifteten und nicht kalibrierten Bildern ohne grosse Nutzereingabe 3D Modelle erstellt werden <sup>6</sup>. Diese Verfahren wurden schon verwendet um mit Bildern aus dem Internet Monumente und ganze Städte zu rekonstruieren <sup>7</sup>.

De Reu u.a.<sup>8</sup> 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 RMSE (root-mean-square error) von meist weniger als 10cm.

Plets u.a.<sup>9</sup> 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 u.a.<sup>10</sup> 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 u.a.<sup>11</sup> 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.<sup>12</sup> und Galeazzi et al.<sup>13</sup> 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.

---

<sup>6</sup>Szeliski 2010, Agarwal u.a. 2011, Furukawa und Ponce 2010

<sup>7</sup>Agarwal u.a. 2011, Furukawa u.a. 2010, Snavely u.a. 2006

<sup>8</sup>Reu u.a. 2013

<sup>9</sup>Plets u.a. 2012

<sup>10</sup>Kawae u.a. 2013

<sup>11</sup>Verhoeven 2011, Verhoeven u.a. 2012

<sup>12</sup>Briese u.a. 2012

<sup>13</sup>Galeazzi 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 auf durch die Diskussion von Verwendung von Drohnen auf Grabungen. Luftbilder eignen sich recht gut für SfM <sup>1</sup> und die verwendete Drohne Parrot AR 2.0 ist wenig 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 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 erfolgrei-

---

<sup>1</sup>Verhoeven 2011, Verhoeven u.a. 2012

chen Einsatz in der Archäologie sind. Bilder können von Fotos, Videos oder einer 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 5.1 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 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.

### 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 5.1.2 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 <sup>2</sup>) 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*.

---

<sup>2</sup>ISTI und CNR 2015

Der folgende Absatz zeige grob deren Funktionsweise auf. Mehr Details finden sich in Abschnitt C.1.

### 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 genug, da sie nur auf wenigen optisch auffälligen Punkten basiert und sie weist einen nicht bekannten Massstab auf, der durch Referenzpunkte manuell skaliert werden muss.

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.

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. Mehr Details dazu finden sich in Abschnitt B.1.

### 4.3.2 Multiview Stereo

Nach 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 Cloud 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. Mehr Details dazu in Anhang C. Der Source Code ist auf github verfügbar <sup>3</sup>.

### 4.4.1 Python

Die Programmiersprache Python <sup>4</sup> 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.

---

<sup>3</sup>Scheuing 2015

<sup>4</sup>Python Software Foundation 2015

#### 4.4.2 OpenCV

OpenCV <sup>5</sup> eine Sammlung von Computer Vision Algorithmen und bietet eine Schnittstelle für Python.

#### 4.4.3 Bundler

Die SfM Implementierung Bundler <sup>6</sup> von Noah Snavely wurde für die Verarbeitung einer grossen Menge an Fotos aus dem Internet geschrieben. Snavely u.a. verwenden Bundler unter anderem dafür Monumente <sup>7</sup> oder ganze Städte <sup>8</sup> aus Fotos aus dem Internet zu rekonstruieren.

#### 4.4.4 PMVS und CMVS

Die Kombination aus PMVS <sup>9</sup> und CMVS <sup>10</sup> ist für den MvS Schritt zuständig. Die Software stammt von Furukawa u.a.<sup>11</sup> und wurde von ihnen für MvS mit unstrukturierten Bildern verwendet <sup>12</sup>.

---

<sup>5</sup>OpenCV 2015

<sup>6</sup>Snavely 2015

<sup>7</sup>Snavely u.a. 2006

<sup>8</sup>Agarwal u.a. 2011

<sup>9</sup>Furukawa und Ponce 2015

<sup>10</sup>Furukawa 2015

<sup>11</sup>Furukawa und Ponce 2010

<sup>12</sup>Furukawa u.a. 2010

# Kapitel 5

## Resultate

### 5.1 Fallstudien

#### 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 eine 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 auf<sup>1</sup>.

#### 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 10h für den SfM Schritt, mit dem eine Sparse Point Cloud erstellt wurde. Siehe [TODO: Bild]. In weiteren 7h Rechenzeit wurde mittels MvS eine Point Cloud von 7 mio Punkten erstellt, die nach grober Bearbeitung auf 4 mio Punkte reduziert wurde. Siehe [TODO: Bild]

#### Beobachtungen

Die Point Cloud ist an Stellen mit optisch auffälliger Struktur, etwa die Mauer selbst, sehr detailreich und exakt. 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.

---

<sup>1</sup>Lawrence 2010



### **5.1.2 Test mit vorhandenen Bildern**

## **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 PhotoScan<sup>2</sup> gelungen eine vollständige Rekonstruktion zu machen. Deshalb kann das Verfahren auf kleine Objekte angewendet so nicht als brauchbare Alternative zu Laserscannern betrachtet werden

---

<sup>2</sup>Siehe Anhang D

# Kapitel 6

## Fazit

### 6.1 Schwierigkeiten

#### 6.1.1 Unkontrolliert, Detailgrad wählen

### 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.

#### 6.2.1 Fotos einbinden (Photo Tourism)

Snavely u.a. verwenden neben Point Clouds in ihrer Darstellung von Monumenten auch die originalen Fotos<sup>1</sup>. 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.

#### 6.2.2 3D Druck

Die Kantonsarchäologie Aargau hat von Vindonissa ein 3D Modell erstellt und dieses von einem 3D Drucker im Massstab 1:450 nachbauen lassen<sup>2</sup>. Das selbe Verfahren lässt sich auf beliebige 3D Modelle anwenden, so auch auf Meshes, die mit SfM erstellt wurden.

#### 6.2.3 Automatisierte Bilderfassung

DRONARCH wurde mit der Idee von automatischer Bilderfassung 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

---

<sup>1</sup>Snavely u.a. 2006

<sup>2</sup>Flück 2010

günstigen Drohnen möglich ist wurde bereits gezeigt<sup>3</sup>, die verfügbare Implementierung davon hat sich aber noch als zu wenig robust herausgestellt.

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

#### **6.2.4 Performance Verbessern**

Die in DRONARCH verwendete Software ist bei weitem nicht die schnellstmögliche und die Rechenzeit könnte durch Optimierungen drastisch verkürzt werden. Im Moment laufen viele Schritte nicht parallel und so könnte man etwa das mit *Multicore Bundle Adjustment* Wu u.a.<sup>4</sup> den SfM Teil parallelisieren.

---

<sup>3</sup>Klein und Murray 2007, Engel u.a. 2014, Alvarez u.a. 2014

<sup>4</sup>Wu 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). [TODO: Bild]

### A.2 Mesh

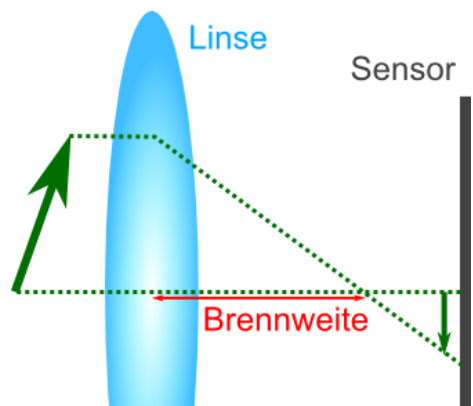
Verbindet man mehrere Punkte einer Point Cloud zu einer Fläche, meist zu Dreiecken, enthält man ein Mesh. Dies hat eine klare Orientierung und setzt Punkte in Verbindung mit ihren Nachbarn. Enthält ein Mesh keine Löcher, nennt man es *watertight* (wasserdicht). [TODO: Bild]

### A.3 Orthofoto

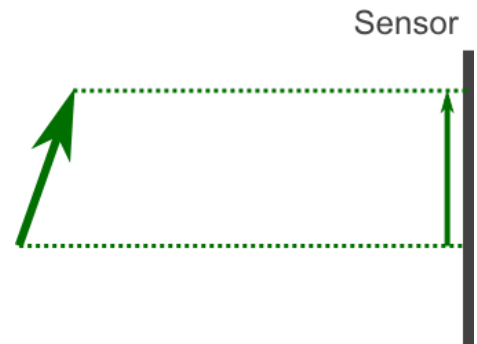
Fotos einer üblichen Kamera, die nach dem Prinzip einer Lochkamera funktionieren, projizieren alle Lichtstrahlen, die durch den Brennpunkt fallen, auf die Bildfläche. Siehe Abbildung A.1a.

Erstellt man einen Plan oder Aufriss, verwendet man nicht die Projektion einer Lochkamera, sondern eine orthographische Projektion (Parallelprojektion, 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) Schematische Darstellung einer gewöhnliche Kamera mit Linse



(b) Schematische Darstellung eines Orthofotos

## 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. [TODO: Bild]

## **Anhang B**

# **DRONARCH verwenden**

### **B.1 Tipps zum Aufnehmen von Fotos**

### **B.2 Parameter**

## **Anhang C**

# **Implementierung**

### **C.1 Computer Vision**

## Anhang D

# Vergleich mit Agisoft PhotoScan

Das Programm PhotoScan von Agisoft<sup>1</sup> implementiert die selben Schritte wie DRONARCH und wurde in der Archäologie schon mehrfach verwendet und dokumentiert<sup>2</sup>. Ein Versuch

---

<sup>1</sup>Agisoft 2015

<sup>2</sup>Galeazzi u.a. 2013, Verhoeven u.a. 2012, Verhoeven 2011, Reu u.a. 2013, Plets u.a. 2012



# 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\\_etal\\_2014.pdf](http://www.chnt.at/wp-content/uploads/Galeazzi_etal_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 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. 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. 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. 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](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)
- Snaveley u.a. 2006 **N. Snaveley/ 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)
- Snaveley 2015 **N. Snaveley**, Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections.  
(<http://www.cs.cornell.edu/~snaveley/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)
- 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](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](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)

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).