

Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung



Markus Rumpler,
Christof Hoppe,
Andreas Wendel,
Graz;
Gerhard Mayer,
Leoben;
Horst Bischof, Graz

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Photogrammetrische Verfahren werden bereits seit vielen Jahrzehnten für Vermessungsaufgaben verwendet. Durch die Weiterentwicklung von unbemannten Flugsystemen (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) und der leistungsfähigen, automatisierten Bildauswertung ergeben sich neue Einsatzbereiche wie z.B. die vermessungstechnische Unterstützung eines Tagebaus. In diesem Artikel beschreiben wir, wie mittels Photogrammetrie auf Basis von Bildern, die von einem Oktokopter aus aufgenommen wurden, eine exakte Rekonstruktion und Vermessung einer im Tagebau typischen Bruchwand durchgeführt werden kann. Für die Genauigkeit und die Vollständigkeit ausschlaggebend sind dabei unter anderem die Redundanz und die Bodenauflösung der aufgenommenen Bilder. Da diese Parameter während der Bildaufnahme ohne Hilfsmittel schwer zu kontrollieren sind, stellen wir ein Verfahren vor, mit dem bereits während des Fluges in Echtzeit sichergestellt wird, dass die aufgenommenen Bilder für die nachfolgende automatisierte, photogrammetrische Auswertung verwendbar sind und die Qualitätsanforderungen erfüllen. Damit verringert sich die Gefahr, den Bildflug wiederholen zu müssen. Wir zeigen, dass mit den so aufgenommen Bildern in Kombination mit einer automatisierten Mehrbildauswertung ohne Zuhilfenahme von externen Pass- und Kontrollpunktmessungen eine Messunsicherheit von unter 0.1% auf einer Länge von 100 m erreicht wird.

Schlüsselwörter: Photogrammetrie, unbemannte Flugsysteme, Luftbild-Datenerfassung, bildbasierte 3D Rekonstruktion, Echtzeit-Qualitätskontrolle, Genauigkeitsauswertung

Abstract

Photogrammetric systems are used for several tasks since decades. The development of small and lightweight Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) that are suited to carry a consumer-grade camera, in conjunction with fully automatic 3D reconstruction systems, supports applications such as recurrent topographical surveys in open pit mining. In this article we describe that a fully automatic photogrammetric system can be used to measure distances on a quarry wall using images acquired by an octo-rotor helicopter. To make the reconstruction more reliable in terms of accuracy and completeness, we propose a method that allows to assess already during the flight if the acquired images are sufficient to achieve the required properties of the offline photogrammetric reconstruction. This method provides online feedback to the user such that he or she can adopt the image acquisition strategy to obtain a complete and accurate reconstruction. We show that based on these images a fully automatic reconstruction pipeline is able to obtain object points with an uncertainty of less than 0.1% of a 100 m quarry wall without the aid of external ground control points.

Keywords: Photogrammetry, Unmanned Aerial Vehicles, Structure-from-Motion, Aerial Imaging, Image-based 3D Reconstruction, Online Feedback, Accuracy Evaluation

1. Einleitung

Photogrammetrische Verfahren werden bereits seit Jahrzehnten in verschiedensten Bereichen der Vermessung eingesetzt. Aus Luftbildern können großflächige Oberflächenmodelle erstellt werden, während terrestrisch aufgenommene Bilder für Detailvermessungen verwendet werden. Ein Anwendungsbereich für diese beiden Arten der Photogrammetrie ist zum Beispiel die bergmännische Vermessung eines Tagebaus.

Die bergmännische Vermessung hat das Ziel und die Aufgabe, in allen Phasen eines Mineralrohstoffprojektes beginnend von der Erkundung über die Erschließung und Gewinnung bis hin zur Nachsorge, die benötigten raumbezogenen Informationen zur Verfügung zu stellen. Dabei werden neben klassischen Vermessungsgeräten wie der Totalstation oder des Laserscanners zunehmend photogrammetrische Methoden eingesetzt. Kombiniert mit der UAV-gestützten

Datenerfassung aus der Luft sind zukünftig viele Vermessungsaufgaben schneller und kostengünstiger durchzuführen.

Während die klassische Luftbildphotogrammetrie durch den Einsatz von bemannten, spezialisierten Flugzeugen hohe Kosten verursacht und dementsprechend nur für sehr große Tagebaugebiete wirtschaftlich ist, wird die terrestrische Photogrammetrie auch in kleinen und mittelgroßen Abbaugebieten, wie sie typischerweise in Österreich und Mitteleuropa vorkommen, eingesetzt. Sie ist wesentlich kostengünstiger und flexibler, aber ihr Anwendungsbereich ist durch den bodengebundenen Aufnahmestandort begrenzt.

Eine Anwendung basierend auf terrestrischen Bildern ist die 3D Rekonstruktion von Bruchwänden zur Sprengplanung. Allerdings ergeben sich durch den bodengebundenen Standort auch Probleme bezüglich Sichtbarkeit bestimmter Szenenbereiche. So kann zum Beispiel der Kopf einer Bruchwand nicht vermessen werden, da er im Sichtschatten liegt, obwohl gerade dieser von besonderem Interesse bei der Sprengplanung ist.

Um die Vorteile der luftgebundenen und terrestrischen Photogrammetrie zu vereinen, bieten sich unbemannte Multirotor-Flugsysteme als Aufnahmeplattform an. Diese durch vier oder mehr Rotoren betriebenen Luftfahrzeuge mit der Größe eines Modellflugzeuges können mit einer handelsüblichen Digitalkamera ausgestattet werden und jeden Punkt im Raum anfliegen. Die Vorteile eines solchen Systems sind vielseitig:

- Flexibilität – Ein UAV ist innerhalb von Minuten einsatzbereit. Es ist keine aufwändige Einschulung des Personals notwendig.
- Sicherheit – UAVs werden ferngesteuert oder fliegen autonom. Somit können Bereiche vermessen werden, die aufgrund von Sicherheitsbedenken nicht vom Menschen betreten werden können.
- Wirtschaftlichkeit – Durch moderate Anschaffungskosten rechnet sich der Einsatz von UAVs auch in kleinen und mittleren Betrieben.
- Vollständigkeit – Da die angebrachte Kamera frei dreh- und schwenkbar ist, kann die Aufnahme immer optimal der Oberflächengeometrie angepasst werden. Somit sind je nach Aufgabenstellung sowohl Detailaufnahmen von senkrechten Oberflächen wie Bruchwänden, als auch klassische, vertikale Luftbildaufnahmen von relativ großen Gebieten möglich.

In Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung ist eine schnelle, kostengünstige und bedarfsgerechte 3D Rekonstruktion möglich. Vollautomatische, bildgestützte 3D Rekonstruktionen wurden zunächst in der Bildverarbeitung entwickelt [1] und werden zunehmend auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Diese sind in der Lage, aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern zunächst die äußere Orientierung der Kamera und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen, um dann in weiteren Schritten eine dichte Punktwolke zu erzeugen [10].

Allerdings stellen automatisierte Verfahren hohe Anforderungen an die Qualität und vor allem an die geometrische Konfiguration der Bilder zueinander. Für die Genauigkeit und die Vollständigkeit ausschlaggebend sind dabei unter anderem die Redundanz und die Bodenauflösung der aufgenommenen Bilder.

So dürfen die Bilder z.B. nicht zu große Skalierungsunterschiede aufweisen und der Blickwinkel zwischen benachbarten Bildern darf nicht zu groß sein (bis zu 30 Grad [2]). Ebenso muss gewährleistet sein, dass ein ausreichender Bildüberlapp gegeben ist, und somit jeder Oberflächenpunkt mindestens in einem Bildpaar zu sehen ist, damit eine Rekonstruktion möglich ist. Durch die Möglichkeit, jeden beliebigen Punkt im Raum anzufliegen, ist es für einen Piloten nicht immer möglich abzuschätzen, ob all diese Parameter erfüllt sind. Dies führt häufig dazu, dass die Rekonstruktion nicht den Genauigkeitsanforderungen entspricht, oder sogar unvollständig ist. Da diese Parameter während der Bildaufnahme ohne Hilfsmittel schwer zu kontrollieren sind, stellen wir in diesem Artikel ein Verfahren vor, mit dem bereits während der Datenerfassung in Echtzeit eine Abschätzung ermöglicht wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die aufgenommenen Bilder für die nachfolgende automatisierte, photogrammetrische Auswertung verwendbar sind und die Qualitätsanforderungen erfüllen. Es verringert sich auch die Gefahr, den Bildflug wiederholen zu müssen.

Zunächst skizzieren wir den Arbeitsablauf einer automatisierten Mehrbildauswertung, deren grundlegende Verfahren in der photogrammetrischen Objektrekonstruktion bereits allgemein bekannt sind und in vielen, zum Teil freien Softwarepaketen zur Verfügung stehen (z.B. VisualSfM, Agisoft PhotoScan, Acute3D, Pix4D, u.a.). Wir beschreiben dann eine neue Methode, mit der bereits während des Fluges die Qualität der Mehrbildauswertung kontrolliert werden kann. Anschließend zeigen wir, dass



Abb. 1: Terrassenförmiger Tagebau am steirischen Erzberg

die automatisierte Mehrbildauswertung es ermöglicht, Vermessungen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich durchzuführen. Wir zeigen, dass mit den so aufgenommenen Bildern in Kombination mit der hier vorgestellten automatisierten Mehrbildauswertung ohne Zuhilfenahme von externen Pass- und Kontrollpunktmessungen eine Messunsicherheit von unter 0.1% auf einer Länge von 100 m erreicht wird.

Die Auswertung erfolgt am Beispiel eines Bild Datensatzes, der eine typische Bruchwand eines Tagebaus zeigt. Aufgenommen wurde dieser Datensatz mit einem Multicopter Flugsystem am steirischen Erzberg (Abbildung 1 und 2).

Im nachfolgenden Abschnitt beschreiben wir die einzelnen Schritte, die bei einer automatisierten Mehrbildauswertung durchgeführt werden, um anschließend die Vermessung einzelner Bildpunkte zu ermöglichen.

2. Automatisierte Mehrbildauswertung

Die automatisierte Mehrbildauswertung wurde zunächst im Bereich der Bildverarbeitung entwickelt und wird zunehmend auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Dabei kann der Prozess der Rekonstruktion in drei Teile gegliedert werden: Bestimmung der äußeren Orientierung der Kameras und der Objektpunkte, Verdichtung der Objektpunkte, und Erstellung eines dreiecksbasierten Oberflächenmodells.

2.1 Bestimmung der äußeren Kameraorientierung und der Objektpunkte

Eine für unbemannte Flugsysteme geeignete automatische Mehrbildauswertung muss mit einer beliebigen Bildkonfiguration zurechtkommen. Im Gegensatz zu meist regelmäßig, streifenweise angeordneten Bildverbänden in der klassischen Luftbildphotogrammetrie stellen beliebige Bildanordnungen und perspektivische Verzerrungen in der terrestrischen beziehungsweise Nahbereichs-Photogrammetrie hierbei besondere Anforderungen an die verwendeten Methoden für die Bestimmung der äußeren Orientierung und der 3D-Rekonstruktion. Als photogrammetrische Sensorplattformen werden in den meisten Fällen UAVs verwendet, die mit einem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) wie beispielsweise GPS, sowie einem elektronischen Kompass, Luftdrucksensoren zur Höhenbestimmung und einer inertialen Messeinheit (IMU) zur Schätzung der Plattformorientierung ausgestattet sind. Mit deren Hilfe ist es bereits möglich, die Position für eine direkte Georeferenzierung der aufgenommenen Fotos auf 1–2 Meter und die Orientierung mit 1–2° Genauigkeit zu bestimmen [17]. Die Messunsicherheit in der Positionsbestimmung mittels GNSS und IMU lässt aber im Allgemeinen keine ausreichende Genauigkeit für eine Bestimmung der Kameraorientierungen zu, welche für die hier vorgestellte automatische bildbasierte



Abb. 2: Oktokopter der Firma Asctec

Rekonstruktion notwendig ist (beispielsweise aufgrund von Abschattung oder Reflexion von GPS-Signalen an Gebäuden, steilen Berghängen, etc.). Deshalb wird die räumliche Lage der Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme bei unserem Verfahren rein durch bildbasierte Methoden ermittelt.

Im Folgenden wird ein vollautomatischer Prozess zur Gewinnung der 3D Objektgeometrie von der Bildaufnahme bis hin zur Erzeugung von Oberflächenmodellen durch Verfahren der Mehrbild-Auswertung beschrieben. Grundlage bilden Algorithmen basierend auf projektiver Stereo- beziehungsweise Mehrbild-Geometrie [1].

Notwendige Verarbeitungsschritte für die Berechnung der äußeren Orientierung sind Kamerakalibrierung, Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse, Bestimmung der relativen Kameraorientierung zweier Kameras aus bekannten Punktkorrespondenzen, das Einfügen neuer Kameras mittels Rückwärtsschnitt, die Berechnung von 3D-Objektkoordinaten durch Vorwärtsschnitt und der Bündelblockausgleich zur Optimierung von Kameraorientierungen und 3D-Koordinaten der Objektpunkte.

Voraussetzung um innerhalb eines Bildes messen zu können ist ein entsprechendes Kameramodell und bekannte Abbildungsparameter der Kamera (innere Orientierung). Dazu gehören der Bildhauptpunkt, die Brennweite des Objektivs, sowie Parameter, welche die Linienverzeichnung beschreiben. Für handelsübliche Digitalkameras, wie sie bei UAVs eingesetzt werden, eignet sich das Lochkameramodell. Diesem liegt das Prinzip der Zentralprojektion zugrunde, welches um die Modellierung der Linienverzeichnung erweitert wird. Die Parameter der inneren Orientierung werden per Kamerakalibrierung ermittelt. Dazu kann ein planares, schwarz-weißes Kalibriermuster verwendet werden. In den aus unter-

schiedlichen Blickrichtungen aufgenommenen Bildern, werden anschließend gut zu lokalisierende Merkmalspunkte extrahiert. Voraussetzung ist, dass ausreichend viele korrespondierende Punktpaare bekannt sind, um die Abbildungsparameter zu bestimmen. Dies wird mittels robuster Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse der extrahierten Merkmalspunkte erreicht. Die Güte der Kalibrierung ist, neben der Redundanz der Bildaufnahme, mitentscheidend für die Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte.

Für die automatisierte Merkmalsanalyse existiert eine Vielzahl an Methoden, um Merkmalspunkte zu detektieren und zu beschreiben. Eine Methode, die robust gegenüber Skalierung, Rotation und Beleuchtungsänderungen ist, ist die Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [2]. Sie ist invariant gegenüber Blickwinkeländerungen von bis zu etwa 30 Grad. Dieses ist daher der maximale Winkel zwischen einem Bildpaar, bei dem eine automatische Korrespondenzanalyse noch möglich ist, was bei der Bildaufnahme berücksichtigt werden muss. Zudem lässt sich die Merkmalspunkteextraktion auf moderner Grafikkarten-Hardwarearchitektur parallelisieren und somit ein enormer Geschwindigkeitsgewinn bei der Berechnung erzielen.

Für ein Bild mit einer mittleren geometrischen Auflösung von beispielsweise 4000×3000 Pixel ergeben sich bis zu 10.000 Merkmalspunkte. Da wir davon ausgehen, dass keine weiteren Informationen über die Bilder wie GPS-Positionen bekannt sind, erfordert die Korrespondenzanalyse in ungeordneten Bildersets zwischen allen Bildpaaren einen flächendeckenden Vergleich aller Merkmalspunkte eines Bildes gegen alle Punkte eines zweiten Bildes. Für einen Datensatz bestehend aus einigen hundert Bildern, wie er hier in dieser für den Tagebau typischen Anwendung dargestellt ist, ist die Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren mit dem hier vorgestellten automatischen Offline-Verfahren in einer Zeit von ca. 2 Stunden möglich. Die vollständige Korrespondenzanalyse zwischen allen möglichen Bildpaaren ist notwendig, um

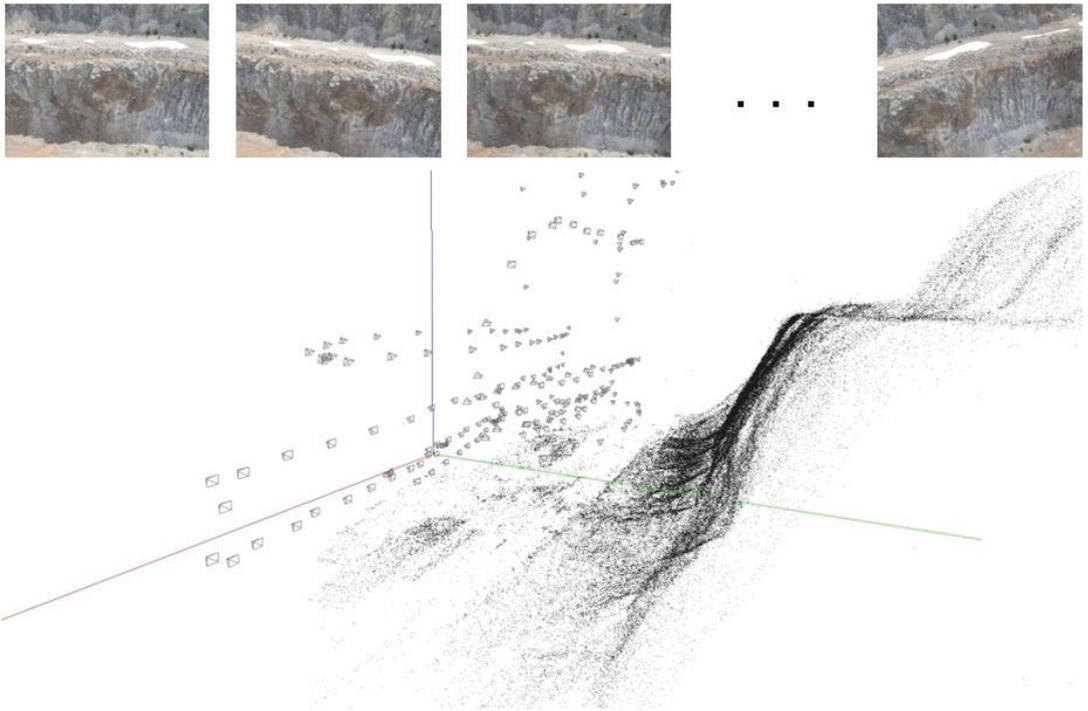


Abb. 3: Äußere Orientierung und triangulierte Objektpunkte aus den aufgenommenen Bildern. Die Punktwolke besteht aus etwa 130.000 Objektpunkten.

möglichst viele Bildmessungen für einen Objektpunkt zu erhalten. Wie in [3] gezeigt wurde, sind die Anzahl der Bildmessungen und ein möglichst großer Triangulationswinkel entscheidend für die Rekonstruktionsgenauigkeit. Der theoretisch optimale Schnittwinkel liegt hierbei bei 90° , von praktischer Relevanz sind wie oben erwähnt Winkel von 20° bis maximal 30° bei Verwendung des SIFT Deskriptors. Die Rechenzeit für die Korrespondenzanalyse kann ebenfalls durch die Verwendung von Grafik-Hardware verringert werden.

Mit Hilfe der gefundenen Korrespondenzen zwischen den Bildpaaren werden nun durch geometrische Verifikation basierend auf dem Fünf-Punkt-Algorithmus [6] die relativen Kameraorientierungen zwischen den Bildpaaren geschätzt und als Epipolar-Graph dargestellt. Da die als Messwerte aufgefassten Merkmalspunkt-Korrespondenzen mit Ausreißern und groben Fehlern behaftet sein können, geschieht dies mittels eines robusten Schätzverfahrens innerhalb einer RANSAC-Schleife [7]. Der so ermittelte Epipolar-Graph stellt die paarweisen Rekonstruktionen und relativen Orientierungen dar, wobei die Knoten den Bildern und die Kanten den relativen Orientierungen zwischen den Bildern entspre-

chen. Ausgehend von einem initialen Bildpaar [2] können nun inkrementell neue Aufnahmen zur Rekonstruktion mittels 3-Punkt-Algorithmus [8], beziehungsweise Rückwärtsschnitt, hinzugefügt werden. Durch robusten Bündelblockausgleich [9] werden Kameraorientierungen und die über Vorwärtsschnitt bestimmten 3D-Punktkoordinaten simultan optimiert und verfeinert.

Als Ergebnis dieser vollautomatischen Mehrbild-Rekonstruktionspipeline erhält man neben den optimierten äußeren Orientierungen der Bilder auch eine bis auf einen Skalierungsfaktor bestimmte 3D-Rekonstruktion der Szene als Punktwolke. Das Ergebnis der äußeren Orientierung der am Erzberg aufgenommenen Bilder ist in Abbildung 3 gezeigt.

2.2 Verdichtung der Objektpunkte

Das Ergebnis des vorherigen Schrittes ist die Bestimmung der äußeren Orientierung und die Triangulierung einzelner Merkmalspunkte. Aufgrund der geringen Anzahl an triangulierten Merkmalspunkten (etwa 500 – 1000 pro Bild, abhängig von der Textur) im Vergleich zur Anzahl der Pixel im Bild (10 Millionen) und deren ungleichmäßigen Verteilung auf der Oberfläche, ist eine exakte Modellierung der Oberfläche noch



Abb. 4: Die durch PMVS2 [10] verdichtete Punktwolke besteht aus etwa 10 Millionen 3D Punkten

nicht möglich. Um die Anzahl an 3D Punkten zu erhöhen, können Stereoverfahren [11] oder auch Mehrbildmethoden [10,16] zum Bild-Matching verwendet werden.

Stereomethoden verwenden zwei rektifizierte Bilder, um für jeden Pixel im Bild eine Tiefe zu bestimmen. Im Fall von Bildern, die mit einem Multitrottkopter aufgenommen wurden, ist eine Rektifizierung aufgrund der geometrischen Anordnung der Kameras häufig nur mit großem Verlust in der Bildauflösung möglich. Daher eignen sich für mittels UAVs aufgenommener Bilder Mehrbildmethoden wie das frei verfügbare PMVS2 [10], das mit beliebigen Kamerakonstellationen zurecht kommt. Abbildung 4 zeigt eine mittels PMVS2 verdichtete Punktwolke der Bruchwand. Diese enthält etwa 10 Mio. 3D Punkte, die annähernd gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt sind.

2.3 Dreiecksbasiertes Oberflächenmodell

Für viele Aufgaben im Bergbau, wie z.B. der Planung von Sprenglöchern, ist eine verdichtete Punktwolke nicht ausreichend, da sie keine geschlossene Oberfläche darstellt. Eine bekannte Methode, die aus dichten, gleichmäßig verteilten 3D Punkten eine Oberfläche extrahiert und auch bei Laserscandaten verwendet wird, ist die Poisson-Rekonstruktion [12]. Diese interpoliert die verdichteten Punkte zu einer geschlossenen Oberfläche. Das Oberflächenmodell der Bruchwand ist in Abbildung 5 zu sehen. Solche Modelle

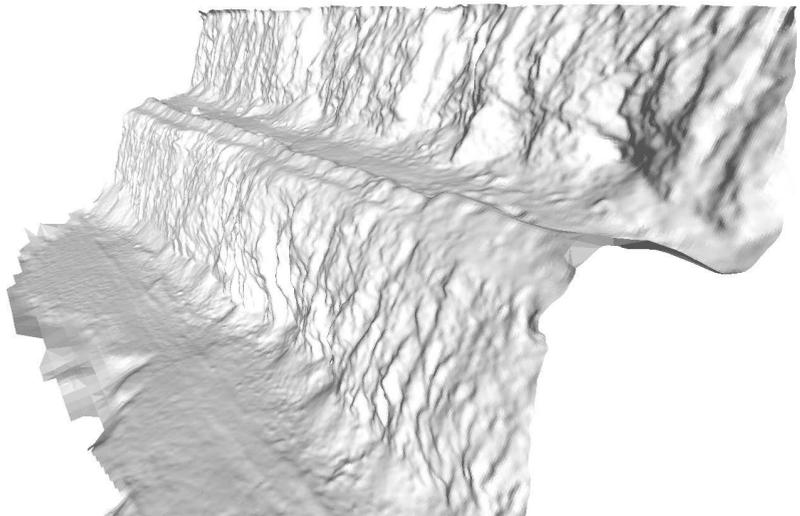


Abb. 5: Dreiecksbasiertes Oberflächenmodell der rekonstruierten Bruchwand

dienen im Bergbau beispielsweise der Planung von Sprenganlagen oder zur Analyse von Klufsystemen.

3. Online Mehrbildauswertung

Die oben beschriebene Mehrbildauswertung garantiert eine sehr hohe Genauigkeit, wie wir in Kapitel 4 zeigen. Allerdings benötigt die Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren zum Teil mehrere Stunden Rechenzeit, und damit ist das Endergebnis erst zeitlich versetzt zur Bildaufnahme verfügbar. Entspricht das Ergebnis nicht den Erwartungen, z.B. aufgrund fehlender Bilder von Bereichen die für die Vermessung relevant gewesen wären, ist eine Wiederholung des Fluges notwendig, was weitere Kosten und Zeitverzögerungen verursacht.

Um bereits während des Fluges beurteilen zu können, ob die aufgenommenen Bilder für eine vollautomatische Rekonstruktion verwendbar sind und die Rekonstruktion den erwarteten Anforderungen entspricht, haben wir eine Methode [14] entwickelt, die bereits während des Fluges die äußere Orientierung der Kameras berechnet und aufgrund der triangulierten Merkmalspunkte die Szenenoberfläche bestimmt. Diese Oberfläche dient dann dazu, die Bodenauflösung und die Redundanz der Rekonstruktion zu visualisieren. Das Verfahren verarbeitet die hochaufgelösten Bilder einer 10 Megapixel Kamera auf einem Notebook mit Quadcore CPU und leistungsfähiger Grafikkarte in Echtzeit. Die Bilder werden vom UAV über eine mit WLAN ausgestattete SD Karte in der Kamera zum Notebook am Boden gesendet.

3.1 Bestimmung der äußeren Orientierung während des Fluges

Das in Kapitel 2 beschriebene Mehrbild-Rekonstruktionsverfahren setzt voraus, dass alle Bilder bereits zu Programmstart vorhanden sind, um eine vollständige, paarweise Korrespondenzanalyse durchführen zu können. Da während der Datenerfassung etwa alle zwei Sekunden ein neues Bild aufgenommen wird, wird die Mehrbildauswertung so modifiziert, dass diese inkrementell per Folgebildanschluss arbeitet. Dies verringert zwar die Genauigkeit der äußeren Orientierung, aber ermöglicht bereits während der Aufnahme, die Szenenabdeckung zu beurteilen. Eine exakte Auswertung erfolgt dann nach der Aufnahme mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren.

Zunächst wird mit Hilfe der ersten beiden aufgenommenen Bilder eine initiale 3D Rekonstruktion erzeugt. Dafür wird zunächst die Korrespondenzanalyse durchgeführt, um mit den daraus resultierenden Korrespondenzen die relative Orientierung des Bildpaares mittels 5-Punkt-Algorithmus [6] zu bestimmen. Anschließend werden mittels Vorwärtsschnitt die 3D Koordinaten der Korrespondenzen bestimmt. Wird ein neues Bild aufgenommen, wird versucht dessen äußere Orientierung zu berechnen und anschließende neue Objektpunkte zu triangulieren. Im Bereich der Bildverarbeitung ist die Bestimmung der Orientierung anhand existierender 3D Punkte als bildbasierte Lokalisierung bzw. Rückwärtsschnitt bekannt. Um die äußere Orientierung des neuen Bildes zu berechnen, werden Korrespondenzen zwischen 2D Merkmalspunkten und rekonstruierten 3D Punkten benötigt. Sind mindestens drei Korrespondenzen bekannt, kann die äußere Orientierung mittels des 3-Punkt-Algorithmus berechnet werden. Anschließend triangulieren wir neue 3D Punkte mit Hilfe der Bilder, die sich in der Umgebung des neu aufgenommenen Bildes befinden.

Um effizient Korrespondenzen zwischen dem zu integrierenden Bild und den existierenden 3D Punkten zu finden, ist eine vollständige Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren nicht möglich, da diese quadratisch mit der Anzahl der Bilder steigt und ein neues Bild etwa alle zwei Sekunden aufgenommen wird. Daher beschränken wir uns bei der Korrespondenzanalyse auf die 10 optisch ähnlichsten Bilder deren äußere Orientierung bereits bekannt ist. Das Finden von visuell ähnlichen Bildern ist im Bildverarbeitungsbereich als „Image Retrieval“ [4,5] bekannt und ist selbst bei extrem großen Datensätzen mit mehreren tausend Bildern in Bruchteilen von

Sekunden möglich. Diese Verfahren sortieren die Bilder anhand der Ähnlichkeit der extrahierten SIFT Merkmalspunkte. Da einige Merkmalspunkte der optisch ähnlichsten und bereits orientierten Bilder mit einem Objektpunkt verknüpft sind, lassen sich so 2D-3D Korrespondenzen zwischen Bildpunkten und bereits rekonstruierten Objektpunkten herstellen. Da hier auch falsche Korrespondenzen gefunden werden, wird die äußere Orientierung des neuen Bildes mit Hilfe von RANSAC gefunden. Somit kann trotz einer Vielzahl von fehlerhaften Korrespondenzen meist die korrekte Position bestimmt werden. Kann keine gültige Kameraposition errechnet werden, da z.B. zu wenige Korrespondenzen gefunden wurden, wird dieses Problem dem Benutzer gemeldet. Eine Programm-Meldung macht dem Benutzer deutlich, dass das aktuelle Bild nicht für eine 3D Rekonstruktion verwendet werden kann, weil z.B. keine Überlappung zur existierenden Rekonstruktion besteht oder die Textur nicht ausreichend ist.

Anschließend bestimmen wir im Vorwärtsschnitt mit den zuvor gefundenen Korrespondenzen, die noch nicht mit einem 3D Punkte verbunden sind, neue Objektpunkte. Um eine Fehlerfortpflanzung zu verhindern optimieren wir den Rückprojektionsfehler mit Hilfe des Bündelblockausgleichs [9]. Um die Rechenzeit konstant zu halten werden hierbei nicht alle Kamerapositionen berücksichtigt, sondern nur jene, die sich in unmittelbarer Nähe zum neuen Bild befinden.

Das oben beschriebene Verfahren benötigt etwa 2 Sekunden um die äußere Orientierung eines 10 Megapixel Bildes zu berechnen und neue Objektpunkte zu triangulieren. Durch die Restriktion der Korrespondenzanalyse und der Beschränkung des Bündelblockausgleichs auf die unmittelbar nächsten Nachbarn erhebt diese Rekonstruktion keinen Anspruch auf eine hohe Genauigkeit. Diese wird nur erreicht wenn eine vollständige Korrespondenzanalyse wie in Kapitel 2 beschrieben durchgeführt wird. Allerdings ermöglicht diese Methode die Abschätzung der erreichbaren Rekonstruktionsqualität bereits während der Bildaufnahme.

3.2 Redundanz- und Bodenauflösungsanalyse

Aus den triangulierten Merkmalspunkten lässt sich für den Benutzer die Qualität der Rekonstruktion nur schlecht ableiten. Für die Genauigkeit maßgebliche Parameter sind zum einen die Redundanz, welche aussagt wie oft ein Oberflächenpunkt gesehen wird, und zum anderen die

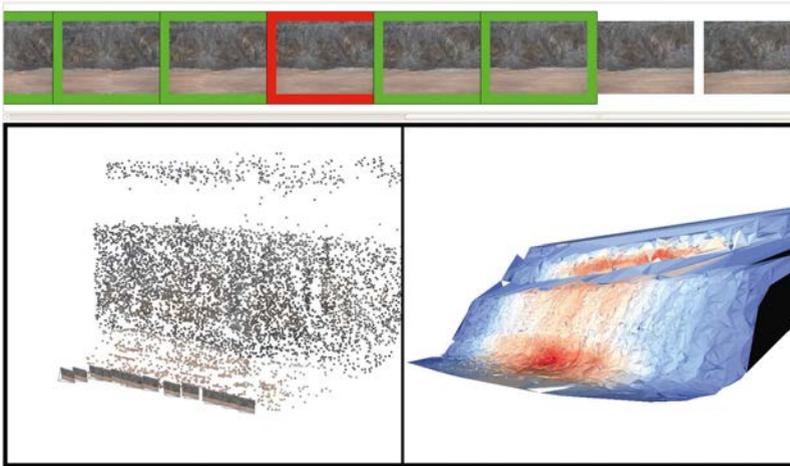


Abb. 6: Visualisierung des Rekonstruktionsergebnisses während der Bildaufnahme. Für das rot umrandete Bild konnte keine äußere Orientierung gefunden werden. Der Pilot sieht sowohl die äußere Orientierung und die Objektpunkte, als auch ein grobes Oberflächenmodell auf dem beispielsweise die Redundanz visualisiert wird. Je rötlicher der Farbton, desto häufiger wurde dieser Szenenbereich bereits fotografiert; blau signalisiert geringe Szenenabdeckung.

Bodenauflösung. Um diese beiden Werte ermitteln und visualisieren zu können, berechnen wir anhand der Objektpunkte ein dreiecksbasiertes Oberflächenmodell. Das in unserem Fall verwendete Verfahren ist näher in [13] beschrieben.

Da die äußere Orientierung der Bilder und die Szenenoberfläche bekannt sind, können sowohl die Redundanz als auch die Bodenauflösung berechnet werden. Anschließend visualisieren wir beide Qualitätsmaße auf der extrahierten Oberfläche mit Hilfe einer Farbkodierung. Für den Piloten ist sofort ersichtlich, welche Bereiche der Szene bereits wie oft fotografiert wurden und mit welcher Bodenauflösung diese rekonstruiert werden können. Diese Darstellung unterstützt den Piloten bei der Gestaltung des Fluges, sodass eine gleichmäßige Abdeckung der Szene mit gleichbleibender Bodenauflösung erreicht wird. Abbildung 6 zeigt das Rekonstruktionsergebnis während des Fluges. Das rot umrandete Bild konnte, im Gegensatz zu den grün markierten Bildern, nicht in die Rekonstruktion integriert werden. Die Bilder, die keine Umrandung besitzen, wurden noch nicht bearbeitet.

4. Testdaten, Genauigkeitsanalyse und Rekonstruktionsergebnisse

Am Beispiel der Rekonstruktion einer typischen Bruchwand eines Tagebaus zeigen wir, dass die UAV gestützte Photogrammetrie in Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung in der Lage ist, eine exakte metrische 3D Rekonstruktion zu erstellen.

Zunächst beschreiben wir den verwendeten Datensatz und die Aufnahme mit einem Multirotorkopter. Wir zeigen, dass unter Zuhilfenahme der Online-Mehrbildauswertung ein Bilddatensatz aufgenommen werden kann, der zu einer

vollständigen Rekonstruktion mit hoher Genauigkeit führt. Weiters zeigen wir, dass auch ohne die Verwendung von händisch vermessenen Passpunkten eine Genauigkeit erreicht wird, die für viele Aufgaben im Tagebau ausreichend ist. Zusätzlich untersuchen wir, wie sich die Skalierungsmethode und die Güte der Kalibrierung auf die metrische Genauigkeit auswirken.

4.1 Testdaten

Die Befliegung der Bruchwand (Abbildung 7) wurde am 18.3.2012 mit einem Oktorotorkopter „Falcon“ der Firma Asctec durchgeführt (Abbildung 2). Dieser ist mit einer frei dreh- und schwenkbaren hochauflösenden Panasonic Lumix DMC-LX3 Digitalkamera mit einer Brennweite von 24 mm ausgestattet. In der Kamera befindet sich eine SD-Speicherkarte die mit einem WLAN Sender ausgestattet ist, damit die Daten während des Fluges auf einen mobilen PC, der als Bodenstation dient, überspielt werden können und bereits die äußere Orientierung der Bilder errechnet werden kann.

Im Falle der Bruchwand wurden 294 Bilder mit einer Auflösung von 10 Megapixel aufgenommen. Aufgrund der gewünschten Genauigkeit im unteren Zentimeterbereich wurden die Aufnahmepositionen so gewählt, dass eine Bodenauflösung von etwa 1cm pro Pixel erreicht wird. Bei der verwendeten Brennweite und der Annahme, dass die Kamera senkrecht zur Oberfläche steht, entspricht dies einem Abstand von etwa 25 m zwischen Kamera und Oberfläche. Weiterhin wurden die Aufnahmepositionen so gewählt, dass eine Überlappung von etwa 80% vertikal und 30% horizontal besteht. Damit ergeben sich bei einer Länge von 100m etwa 30 Bilder pro Streifen. Um die Fehlerfortpflanzung innerhalb einer einzelnen Reihe zu reduzieren, wurden zu-



Abb. 7: Bildaufnahme von insgesamt 294 Bildern einer Bruchwand am Erzberg

sätzliche Bilder in größerer Entfernung (ca. 50 m) aufgenommen, welche die Bruchwand sowohl fronto-parallel als auch schräg zeigen.

4.2 3D-Punktwolke und Bruchwandprofile

Ausgehend vom aufgenommenen Bilddatensatz und einer bekannten Kamerakalibrierung erhalten wir mit unserer vollautomatischen Rekonstruktionspipeline die äußeren Orientierungen der Bilder sowie eine Punktwolke bestehend aus den rekonstruierten Merkmalspunkten (siehe Abbildung 3). Aufgrund der guten Texturierung der Oberfläche ist die Dichte der Objektpunkte bereits ohne die Anwendung pixelweiser Bild-Matching-Methoden sehr hoch und die Szene gut erkennbar. Abbildung 4 zeigt ein nochmals verdichtetes und texturiertes Modell, in dem bis hin zu feinen Details die Geometrie und Textur der Bruchwand gut erkennbar ist. Aus diesem Modell lassen sich bereits Schnitte der Bruchwand ableiten (Abbildung 8). Im Gegensatz zur Rekonstruktion aus terrestrischen Aufnahmen, bei denen der Kopfbereich der Bruchwand nicht zu sehen wäre, ist hier das gesamte Profil sichtbar. Diese durch die Luftaufnahmen gewonnene Zusatzinformation ist besonders für Anwendungen wie zum Beispiel die Planung der Sprenganlage wichtig.

4.3 Evaluierungsmethode und Genauigkeitsauswertung

In der Bildverarbeitung wird häufig der Rückprojektionsfehler der Objektbeziehungsweise Merkmalspunkte als adäquates Maß für die Beurteilung der Genauigkeit der äußeren Kameraorientierung herangezogen. Für photogrammetrische Anwendungen hingegen ist die Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte von Interesse. Unsere Evaluierung stützt sich deshalb auf den Vergleich mit bekannten Referenzpunkten.

Zu diesem Zweck wurden an der Bruchwand mit ca. 24 m Höhe und 100 m Länge

Referenzpunkte markiert und mittels klassischer Vermessung mit Totalstation deren Position bestimmt. Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Marker an der Bruchwand. Alle Marker sind farblich gut von der Bruchwand unterscheidbar und nummeriert. In der verdichteten Punktwolke bestehend aus ca. 10 Mio. 3D-Punkten sind insgesamt 74 Marker identifizierbar rekonstruiert und können somit eindeutig den händisch vermessenen Referenzpunkten zugeordnet werden.

Da die Anbringung und Vermessung von Referenzpunkten an einer Bruchwand hohen personellen und technischen Aufwand bedeutet, ist diese in der Praxis für eine Sprengplanung

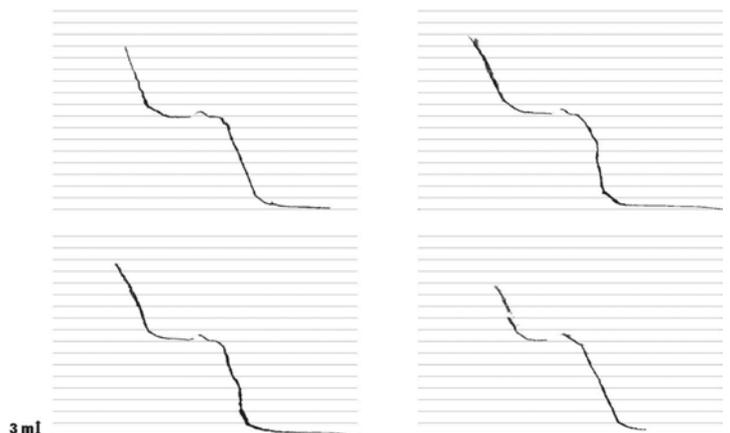


Abb. 8: Bruchwandprofile mit rekonstruiertem Kopfbereich der Abbauterrasse. Im Vergleich zu terrestrischen Aufnahmen ist in den Schnitten der Abbauwand das gesamte Profil sichtbar.

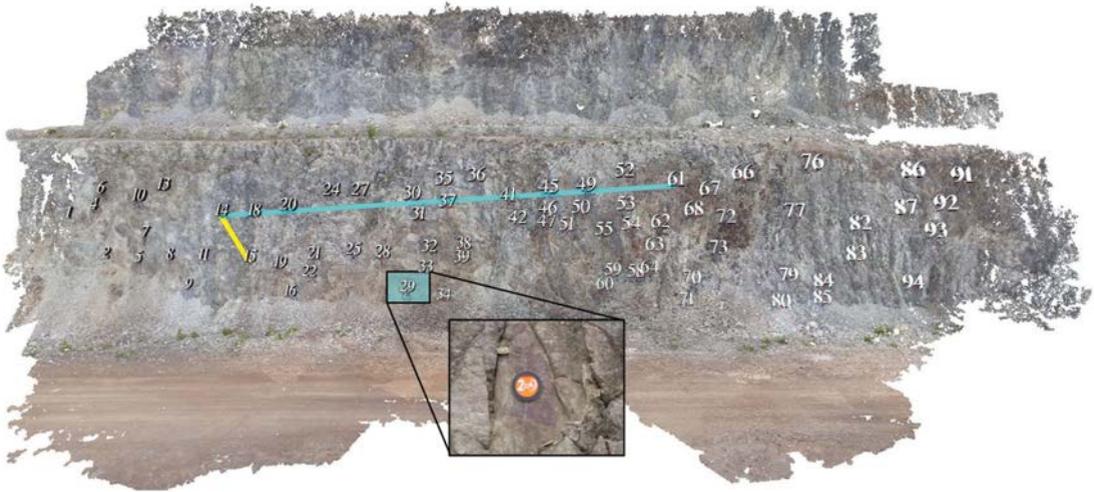


Abb. 9: Anordnung der mit einer Totalstation vermessenen Referenzpunkte an der Bruchwand. Jeder Referenzpunkt ist durch einen nummerierten Marker eindeutig identifiziert. Die bekannten metrischen Entfernungen der mit Linien verbundenen Punkte 14 und 15 beziehungsweise 14 und 61 werden zur Skalierung des rekonstruierten Modells verwendet.

nicht möglich. Das Kosten-Nutzen Verhältnis dafür ist zu hoch. Daher zeigen wir, dass für viele Vermessungsaufgaben im Bergbau eine ausreichende metrische Genauigkeit auch ohne Referenzpunkte erreicht werden kann. Daher werden diese nicht im Bündelblockausgleich berücksichtigt und nur zur Evaluierung herangezogen. Weiterhin zeigen wir den Einfluss der Qualität der Kamerakalibrierung auf die Rekonstruktionsgenauigkeit. Dafür untersuchen wir, wie sich die projektbegleitende Kalibrierung (on-the-job-Kalibrierung) der intrinsischen Kameraparameter während des Bündelblockausgleichs auf das Gesamtergebnis auswirkt.

4.3.1 Skalierung

Die äußere Orientierung der Kameras erfolgt zunächst in einem eigenen Koordinatensystem und ist demnach nicht metrisch. Um die Rekonstruktion in ein metrisches Koordinatensystem zu bringen, gibt es mehrere Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit besteht darin, dass man den Abstand zwischen zwei Kameras während der Aufnahme misst. Da durch die äußere Orientierung die Distanzen zwischen den Kamerazentren im Rekonstruktionsmaßstab und der entsprechende metrische Maßstab bekannt sind, kann ein Skalierungsfaktor berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der Abstand von zwei rekonstruierten 3D Punkten im metrischen System vermessen wird. Die Bestimmung des metrischen Abstandes zweier Punkte kann sehr günstig und einfach mit einem Laserdistanzmesser geschehen. Im Vergleich zu

einem Theodoliten ist dieser sehr günstig und kann auch von nicht geschultem Personal verwendet werden. [15] hat diese und noch weitere Verfahren zur metrischen Skalierung auf deren Genauigkeit untersucht und argumentiert, dass das Skalieren über zwei (oder mehr) bekannte Szenenpunkte die größte Genauigkeit liefert. Da in unserem Fall die Positionen der Referenzpunkte und damit auch die Distanzen zwischen ihnen bekannt sind, verwenden wir genau eine einzelne gemessene Distanz zur Skalierung der rekonstruierten Szene (Abbildung 9). Im folgenden Abschnitt untersuchen wir, wie die Wahl der zur Skalierung gewählten Distanz die Messgenauigkeit beeinflusst.

4.3.2 Evaluierung der relativen Punktgenauigkeit

Wir betrachten im Speziellen zwei Fälle, um den Maßstab für die metrische Skalierung der Rekonstruktion zu ermitteln. (1) Die Skalierung über zwei vertikale Punkte mit einer kleinen Entfernung von 6.92 m und (2) über zwei horizontale Punkte mit einer großen Entfernung von 52.38 m.

In beiden Fällen berechnen wir die relativen Punktabstände zwischen allen möglichen Punktpaaren und tragen die Differenz des jeweiligen Punktabstandes zum Abstand der korrespondierenden Referenzpunkte als Datenpunkt über der Referenzlänge auf. Daraus ergibt sich eine Verteilung der relativen Abstandsfehler der Punkte bezogen auf deren Entfernung. Beide Experimente führten wir sowohl mit zu Beginn der Rekonstruktion bestimmten Kameraparametern

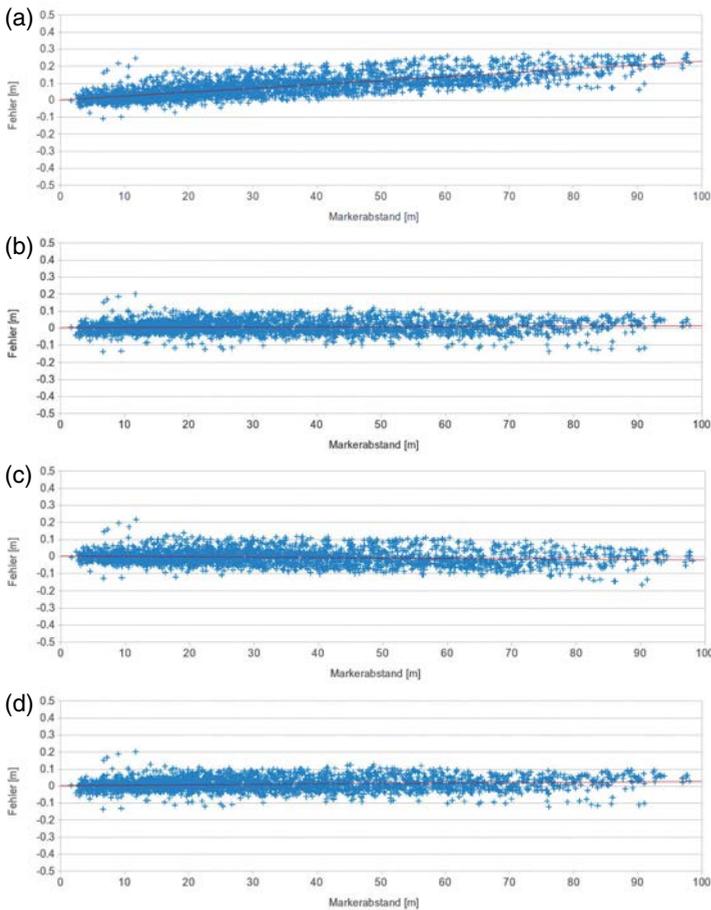


Abb. 10: Relative Fehler der Punktabstände zur Ground Truth (Referenzabstände) bei Skalierung über

(a) eine kurze Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 15 (Kameraparameter für alle Bilder fix),

(b) eine kurze Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 15 (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt),

(c) eine lange Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 61 (Kameraparameter für alle Bilder fix),

(d) eine lange Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 61 (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt).

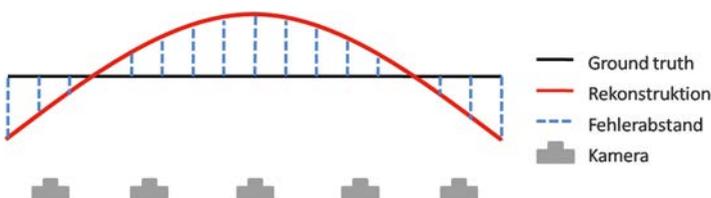


Abb. 11: Schematische Darstellung der Rekonstruktion und Fehlerverteilung. Systematische Fehler entstehen aufgrund einer Verformung des Bildblocks durch den Bündelblockausgleich.

tern für die innere Orientierung, wie auch projektbegleitend mit im Bündelblockausgleich optimierten Kameraparametern durch (siehe Abbildung 10).

Zu beobachten ist, dass bei einer Skalierung über eine kurze Distanz (Abbildung 10a), der relative Fehler der Punktabstände mit der Entfernung zunimmt. Wird die Kamerakalibrierung hingegen beim Bündelblockausgleich projektbegleitend bestimmt und optimiert (Abbildung 10b), verläuft der Fehler über alle Punktdistanzen annähernd konstant. Daraus ist abzuleiten, dass für den Fall von fixen intrinsischen Kameraparametern bereits die Kamerakalibrierung mit größter Sorgfalt durchgeführt werden muss, um Rekonstruktionsungenauigkeiten durch Fehlerfortpflanzung gering zu halten. Bei Skalierung der Rekonstruktion über eine längere bekannte Punktdistanz ist der Unterschied zwischen fixierten (Abbildung 10c) und projektbegleitend optimierten Kameraparametern (Abbildung 10d) weniger ausgeprägt.

Die Art der Skalierung stellt bei projektbegleitender Kalibrierung der Kameraparameter keinen merklichen Unterschied in der Genauigkeit dar. Die Standardabweichung der Fehler im Falle von projektbegleitender Kalibrierung der internen Kameraparameter beträgt bei beiden Skalierungsvarianten ca. 3.8 cm. Somit liegen 99.7% aller Messungen innerhalb einer Genauigkeit von $\pm 11.4\text{cm}$ (3σ), was für die meisten Vermessungsaufgaben im Bergbau absolut ausreichend ist.

4.3.3 Georeferenzierung und absolute Positionsgenauigkeit

Um die absolute Positionsgenauigkeit der rekonstruierten Markerpunkte in Szenenkoor-

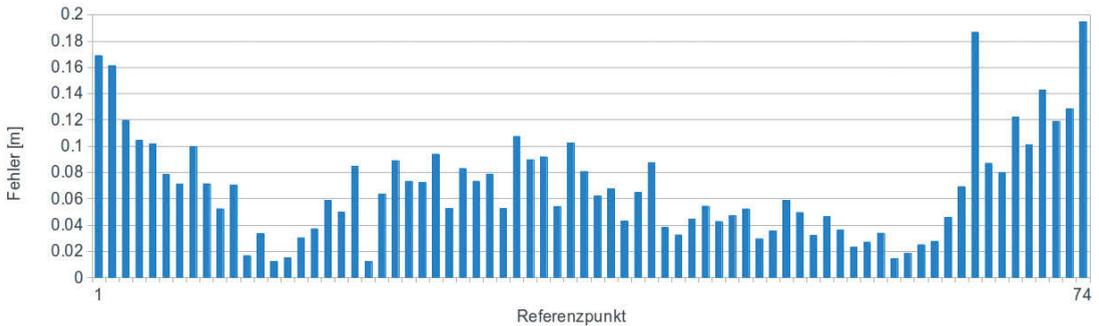


Abb. 12: Absolute Positionsfehler nach Georeferenzierung (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt)

dinaten zu evaluieren, wird die rekonstruierte 3D-Punktvolke der Bruchwand mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (3D Helmertransformation) in das Szenenkoordinatensystem transformiert. Die Helmertransformation dient dabei zur formtreuen Georeferenzierung der Rekonstruktion aus einem lokalen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem in ein entsprechendes geographisches, metrisches Zielsystem. Die Methode kann mittels einer Minimalanzahl von nur drei Punktkorrespondenzen zwischen rekonstruiertem Modell und Referenzmessungen berechnet werden. Eine größere Anzahl an Punkten und robuste Schätzung der zur Registrierung nötigen Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erhöhen die Genauigkeit der Ausrichtung des Modells.

Abbildung 12 zeigt eine Auswertung der absoluten Positionsfehler aller rekonstruierten Markerpunkte zu deren Position im Referenzmodell. Daraus ist erkennbar, dass der durchschnittliche Fehler im Zentrumsbereich der Rekonstruktion bei ca. 5 cm liegt. Weiters ist beobachtbar, dass sich der Fehler zu den Rändern hin leicht erhöht. Es kommt zu einer Verformung des Bildblocks durch den Bündelblockausgleich. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 11 gezeigt. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Szene zum Rand hin von weniger Bildern gezeigt wird. Weniger Bildüberlapp führt zu weniger Bildmessungen pro Objektpunkt und damit dazu, dass der Epipolar-Graph, wie er in Kapitel 2 beschrieben wurde, an den Rändern weniger Verbindungen hat. Das hat zur Folge, dass das Ergebnis der Optimierung der Kamerapositionen und 3D-Objektpunkte im Bündelblockausgleich weniger stark eingeschränkt wird und sich die Positionen damit stärker verändern können.

Eine Möglichkeit, die durch die Verformung des Bildblocks entstehenden systematischen

Fehler zu vermeiden, ist die Einbringung bekannter Pass- und Kontrollpunkte sowie von direkt gemessenen GPS-Koordinaten der Kamerapositionen in den Bündelblockausgleich, wie dies in der klassischen Photogrammetrie angewendet wird. Dies führt einerseits zu kleineren Residuen, andererseits lässt sich ein gleichzeitiger Übergang in ein entsprechendes Referenzkoordinatensystem bewerkstelligen. Unser Fokus liegt in der rein bildbasierten Rekonstruktion ohne Verwendung von Pass- und Kontrollpunkten, da deren Anbringung und anschließende Vermessung per Totalstation nicht immer möglich und sinnvoll ist. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass der Bereich der Befliegung größer gewählt wird als die eigentlich gewünschte Rekonstruktion, beziehungsweise durch eine veränderte, hierarchische Bildaufnahmestrategie, um einen dichteren Epipolar-Graphen zu erhalten. Obwohl unsere Methode rein bildbasierend arbeitet, liegt der mittlere absolute Fehler über alle Messpunkte bei 6.87cm im Vergleich zu den mittels Theodolit vermessenen Markern, und ist damit auch im Bezug auf die absolute Positionsgenauigkeit für die meisten Anwendungen im Bergbau ausreichend.

5. Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass mittels eines Multirotor-UAVs aufgenommener Bilder in Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung vollständige und exakte 3D Rekonstruktionen erzeugt werden können. Damit ergeben sich für die Vermessung im Tagebau neue Anwendungen, wie eine exakte Sprengplanung oder regelmäßige Inventuren, die ohne die UAV-gestützte Bildaufnahme personell und zeitlich sehr aufwändig wären.

Das häufig in der Praxis auftretende Problem, dass die während des Fluges aufgenommenen Bilder nicht für eine automatisierte photogrammetrische Auswertung geeignet sind, wird durch das von uns entwickelte System verringert und

macht für viele, speziell kleinräumige Anwendungen eine klassische Flugplanung überflüssig. Eine metrische Skalierung der gewonnenen dreidimensionalen Rekonstruktion ist ohne Vorwissen über die Szene und bereits durch eine einzelne, in der Szene bekannte Distanz möglich.

Der nächste logische Schritt ist es, die Steuerung des UAVs zu automatisieren. Anhand der aktuellen Güte der Rekonstruktion während des Fluges kann das UAV die nächste Position für die Bildaufnahme selbst bestimmen und diese anfliegen. Damit wird sich der Aufwand für die Rekonstruktion besonders bei komplexen 3D-Geometrien wie Brücken oder Gebäuden weiter verringern, und kann somit viele Bereiche der klassischen Vermessung erweitern.

Für das Beispiel des Tagebaus wird die UAV-basierte Photogrammetrie voraussichtlich schon in naher Zukunft eine große Rolle spielen und viele Messaufgaben wesentlich vereinfachen können.

Referenzen

- [1] *Hartley, R. and Zisserman, A.*, Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000.
- [2] *Lowe, D.*, Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. Journal of Computer Vision* 60(2), pp. 91–110, 2004.
- [3] *Rumpler, M., Irschara, A. and Bischof, H.*, Multi-View Stereo: Redundancy Benefits for 3D Reconstruction. *Proceedings of the 35th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition*, 2011.
- [4] *Nistér, D. and Stewenius, H.*, Scalable recognition with a vocabulary tree. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2161–2168, 2006.
- [5] *Sivic, J. and Zisserman, A.*, Video google: A text retrieval approach to object matching in videos. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1470–1477, 2003.
- [6] *Nistér, D.*, An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 26(6), pp. 756–770, 2004.
- [7] *Fischler, M. A. and Bolles, R. C.*, Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Communication Association and Computing Machine* 24(6), pp. 381–395, 1981.
- [8] *Haralick, R. M., Lee, C., Ottenberg, K. and Nölle, M.*, Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 592–598, 1991.
- [9] *Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. and Fitzgibbon, A.*, Bundle adjustment – A modern synthesis. In: *Vision Algorithms: Theory and Practice*, pp. 298–375, 2000.
- [10] *Furukawa Y. and Ponce J.*, Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 32(8), pp. 1362–1376, 2010.
- [11] *Hirschmüller H.*, Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2005.
- [12] *Hoppe, H.*, Surface reconstruction from unorganized points. PhD Thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, June 1994.
- [13] *Labatut P., Pons J.P. and Keriven R.*, Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2007.
- [14] *Hoppe C., Klopschitz M., Rumpler M., Wendel A., Kluckner S., Bischof, H. Reitmayr G.*, Online Feedback for Structure-from-Motion Image Acquisition. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2012.
- [15] *Sturzenegger M., Stead, D.*, Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 2009.
- [16] *Irschara A., Rumpler M., Meixner P., Pock T., Bischof H.*, Efficient and Globally Optimal Multi View Dense Matching for Aerial Images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012.
- [17] *Pfeifer N., Gliira P., Briese C.*, Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Markus Rumpler, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: rumpler@icg.tugraz.at

Dipl.-Ing. Christof Hoppe, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: hoppe@icg.tugraz.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Wendel, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: wendel@icg.tugraz.at

AssProf. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Mayer, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Department Mineral Resources and Petroleum Engineering, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Str. 18, A-8700 Leoben.
E-Mail: gerhard.mayer@mu-leoben.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Bischof, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: bischof@icg.tugraz.at