

Hochauflösende Erfassung und Visualisierung großer Gebäudestrukturen zur Bestandsdokumentation im Rahmen des Weltkulturerbes

Dr. Matthias RÜTHER¹ und Dr. Xiaoming XU²

¹Holistic Imaging, Graz · ruether@holistic-imaging.com

²Stadtvermessung Graz, Graz · Xiaoming.Xu@stadt.graz.at

Zusammenfassung

Die dreidimensionale Erfassung von Gebäuden stellt heute einen unverzichtbaren Bestandteil einer Bestandsdokumentation dar. Die Anwendungsgebiete solcher Daten liegen in der Baudokumentation und Iststands-Dokumentation im Denkmalsschutz, aber genauso im Bereich der Städteplanung.

Um eine solche Dokumentation durchzuführen, stehen heute zahlreiche Technologien zur Verfügung: terrestrischer LIDAR, LIDAR am Flugzeug, Luftbild-Photogrammetrie und Nahbereichs-Photogrammetrie. Das unbemannte Luftfahrzeug (Unmanned Aerial Vehicle, kurz UAV) eröffnet in diesem Zusammenhang neue Möglichkeiten. Eingesetzt als flexibler Sensorträger erlaubt es uns das Luftfahrzeug, vom Boden aus uneinsichtige Bereiche zu erfassen und trotzdem im Nahbereich um das Objekt zu agieren.

In dieser Arbeit stellen wir die dreidimensionale Erfassung eines denkmalgeschützten Gebäudes in Graz vor. Das Schloss Eggenberg zählt zum UNESCO-Welterbe und stellt in Größe und Topologie eine Herausforderung bei der vollständigen dreidimensionalen Erfassung dar. Im Rahmen unserer Arbeit wurden die Dachlandschaft, die fünf Türme, alle Außenfassaden und die drei Innenhöfe in einem Gesamtmodell ausschließlich mittels UAV-Kamera erfasst, und ein photogrammetrisches 3D Modell mit einer Auflösung von 5 mm berechnet.

Durch die hohe Auflösung ist es nunmehr möglich auch kleine Schäden an der Gebäudestruktur zu erkennen und zu dokumentieren, und es kann in weiterer Folge zu nachgereichten Auswertungen herangezogen werden.

1 Einleitung

Im Rahmen der dreidimensionalen, photogrammetrischen Erfassung von Gebäuden stellen sich generell folgende Herausforderungen: Datenaufnahme, Verrechnung und Darstellung.

Speziell bei Gebäuden mit einer Höhe über 30 m und steilen Giebeldächern ist die Zugänglichkeit zu vielen Bereichen der Dachlandschaft nicht gegeben. Ein Einsatz von stationären Sensoren wie terrestrischem LIDAR stößt hier schnell an seine Grenzen. Eine Flugdrohne liefert hier die nötige Flexibilität, um auch schwer zugängliche Orte zu erreichen. Ausgestattet mit einer bewegungsstabilisierten Kamera können auf diese Weise gleichzeitig

Hanke, K. & Weinold, Th. (Hrsg.) (2017): 19. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2017.

© Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach. ISBN 978-3-87907-xxx-x.

Fassaden, Dächer, Türme, Innenhöfe etc. aufgenommen werden. Die Bilder sind typischerweise mit einer GNSS-Position geringer Genauigkeit und Rotationsparametern des Gimbal (stabilisierter Kameraträger) verknüpft. Ziel der Datenaufnahme ist es nun, möglichst alle Gebäudebereiche mit einer Bildüberlappung von 70-80 % und in der geforderten Auflösung aufzunehmen. Weiters müssen in Bereichen, in denen eine photogrammetrische Verknüpfung der Bilder schwierig ist (z.B. Innenhöfe gegen Außenbereich) entsprechend Stützpunkte gesetzt werden. Im Rahmen dieses Projektes benutzten wir eine Multicopter-Drohne mit entsprechender Zertifizierung und eine 16 MPixel Kamera zur Datenaufnahme.

Die Verrechnung der Bilddaten erfolgt in einem Nachbearbeitungsschritt. Da mit hochauflösenden Kameras schnell bis zu einhundert Gigabyte an Bilddaten anfallen, muss auch die Verrechnung dieser Daten mit effizienten Algorithmen erfolgen. Die Abfolge an Verarbeitungsschritten folgt im Wesentlichen jenen einer klassischen Photogrammetrie-Pipeline: Aerotriangulation, Verdichtung von Punktwolken und Berechnung eines Dreiecks-Mesh. Typische Probleme der 3D-Rekonstruktion in Bereichen mit geringer Oberflächentextur oder scharfer Kanten sind mit modernen global-optimierenden Verfahren mittlerweile unproblematisch. Die Basis für die Photogrammetrische Auswertung bildete hierbei das Softwarepaket UnlimitedAerial, welches sowohl für UAV-Bilder, als auch für großformatige Luftbilder eingesetzt werden kann,

Ein zunehmendes Problem der Photogrammetrie ist die effiziente Darstellung der Ergebnisse. Ein dreidimensionales Gebäudemodell mit einer Auflösung im Millimeter-Bereich erreicht schnell eine Größe von mehreren Gigabyte. Solche Modelle können mit den meisten Softwarepaketen selbst auf leistungsfähigen Rechnern zu Problemen in der Darstellung führen und machen ein effizientes Arbeiten unmöglich. Wir setzen in diesem Kontext ein spezialisiertes Paket zur Datenvisualisierung ein, welches auch 3D Modelle bis zu einer Größe von mehreren Terabytes auf Standard-PCs effizient darstellen kann.

Die Kombination aller eingesetzten Werkzeuge bildet ein effizientes System, mit welchem auch schwierige Objekte effizient und einfach in ein 3D Modell übergeführt werden können.

2 Stand der Technik

2.1 Unbemannte Kamera-Plattformen

Moderne UAV können einfach mit digitalen Kameras ausgestattet werden, welche auf einer Bewegungs-stabilisierten Dreh-/Schwenkeinheit montiert sind. Im Vergleich zu einer NADIR Konfiguration, erhält man dadurch die Freiheit, Flächen unterschiedlicher Neigung mit gleichbleibender Auflösung aufzunehmen. Ein typisches Multicopter-UAV weist dabei eine Flugzeit von 10 bis 20 Minuten auf, während ein Starrflügel-UAV zwischen 30 und 90 Minuten Flugzeit ausweist. Dies muss bei der Flugplanung berücksichtigt werden, sowohl was den Flugpfad betrifft, als auch die Menge an Verfügbaren Akkus. Die typische Bildauflösung liegt zwischen 5 MPixel und 35 MPixel, abhängig von Kameramodell und möglicher Zuladung des Fluggerätes. Die Fluggeräte sind typischerweise mit GNSS Empfängern ausgestattet, welche einen Flug nach Wegpunkten erlauben. Bei komplexen Formen des zu befliegenden Objektes empfiehlt sich jedoch eine Kombination aus Wegpunktflug für homogene Flächen und ferngesteuertem Flug für schwer zu erreichende Bereiche.

Als flexible Alternative im städtischen Bereich erweist sich auch der Fesselballon. Er kann, ähnlich einem UAV, ein stabilisiertes Kamerasystem tragen und erreicht eine ähnliche Flughöhe wie die gesetzlich vorgegebene UAV-Flughöhe. Die Einschränkung einer fixen Verbindung zum Boden wird durch den rechtlich unbedenklichen Einsatz im städtischen Bereich und durch die nahezu unbegrenzte Flugzeit kompensiert.

2.2 3D Rekonstruktion

Die automatisierte Berechnung von dreidimensionalen Daten (Punktwolken, Meshes, 2,5D Höhenmodelle) aus überlappenden Bildern ist mittlerweile ein gut verstandenes Problem. Robuste Algorithmen sind kommerziell verfügbar und werden auch vom Unternehmenspartner erfolgreich vertrieben. Dieses Projekt basiert auf Daten von Consumer-Kameras, montiert auf unbemannten Fluggeräten. Die Luftbilder werden typischerweise in einem regelmäßigen Raster vertikal (NADIR), mit einem Winkel zur Oberflächennormalen – idealerweise 90 Grad – aufgenommen.

Der Prozess der 3D Rekonstruktion gliedert sich dabei in drei Phasen:

„Structure from Motion“ oder Aerotriangulation: exakte Bestimmung der Kamera-Parameter und äußeren Orientierungen auf Basis von Verknüpfungspunkten, Kontrollpunkten, GNSS-Daten und IMU-Daten.

Densifizierung: für jeden Kamera-Pixel wird die Tiefe des abgebildeten Objektes bestimmt, das Ergebnis ist eine perspektivische Tiefenkarte.

Fusionierung von Tiefenkarten: Messungen unterschiedlicher Kameras werden zu einem gemeinsamen Modell fusioniert.

2.2.1 Aerotriangulation

Die Ausgangsbasis jeder photogrammetrischen 3D Rekonstruktion ist eine Menge von Bildern und optional dazugehörige GNSS-Positionsmessungen der Kameras, Daten von Trägheitsnavigationssystemen (IMU), Boden-Kontrollpunkte mit bekannten Positionen und die innere Orientierung der Kamera.

Zwischen überlappenden Kameras werden automatisch korrespondierende Punkte identifiziert, und geometrisch verifiziert, so dass sie mit einer Epipolargeometrie des Kamera-Paares konsistent sind. Als letzter Schritt werden im Rahmen eines Ausgleichsverfahrens jene Kamera-Orientierung und intrinsischen Parameter bestimmt, welche den geringsten Rückprojektionsfehler auf die Verknüpfungspunkte und Kontrollpunkte, sowie die geringste Abweichung zu GNSS Daten und IMU Daten aufweisen. Als Fehlerfunktion wird typischerweise die Summe der kleinsten Quadrate eingesetzt, und im Rahmen eines nichtlinearen Ausgleichsverfahrens minimiert. Optional können zusätzliche Parameter wie GNSS Verschiebung und Drift, Bore-sight Misalignment etc. abgeschätzt werden.

Diese Methode, auch als Aerotriangulation bezeichnet, geht auf BROWN (1976) zurück. Methoden am Stand der Technik können mit geordneten Mengen an Bildern wie in POLLEFEYS (2004) und ungeordneten Bildmengen, wie in WU (2015), umgehen. Moderne Rechner-Architekturen erlauben es, Grafikprozessoren auszunutzen und extrem große Probleme zu lösen (AGARWAL 2009). Außerdem kann das Problem auch inkrementell gelöst werden (HOPPE 2012).

Die berechneten Verknüpfungspunkte stellen bereits ein loses, ungeordnetes 3D Modell dar, welches jedoch einen zu geringen Detailgrad aufweist. Im nächsten Schritt werden die verfeinerten Kamera-Parameter benutzt, um aus überlappenden Bildbereichen und den verfeinerten Kamera-Parametern eine Menge von dichten Tiefenkarten zu berechnen.

2.2.2 Dichte 3D Rekonstruktion

Gegeben sei eine Menge von kalibrierten Kameras (min. 2). Das Ziel der dichten 3D Rekonstruktion ist es, für jeden Pixel im Überlapp-Bereich von zwei oder mehr Kameras eine geometrische Tiefe (i.e. Abstand vom Projektionszentrum der Kamera) zu berechnen. Alternative Ansätze berechnen auch direkt 3D Koordinaten im Objektraum, ohne den Umweg über perspektivische Tiefendaten.

Man unterscheidet prinzipiell zwischen Ansätzen, welche Kameras paarweise betrachten, für jedes überlappende Kamera-Paar ein Disparitätsfeld berechnen und diese dann fusionieren, und Multi-View Ansätzen, welche alle überlappenden Bildbereiche direkt betrachten.

Die Benchmarks von SCHARSTEIN (2002) und SCHARSTEIN (2001) und SEITZ (2006) geben eine gute Übersicht über den Stand der Technik.

Ein populärer Ansatz für Multi-View Rekonstruktion ist das Plane-Sweep Verfahren von COX (1996), welches sich speziell für die Parallelisierung auf Grafikprozessoren eignet und für Bilder mit mehreren hundert Megapixel skalierbar ist (ROTHERMEL 2012).

2.2.3 Datenfusion

Das Resultat des vorherigen Schrittes ist eine Menge an 3D Datensätzen, welche jeweils nur einen Teil des Gesamtmodells abbilden. Diese sind typischerweise überlappend, und stellen somit redundante Information dar, welche in einem letzten Schritt robust fusioniert wird. Das Resultat der Fusion ist entweder eine 2.5D Repräsentation wie in ZEBEDIN (2010), oder eine komplette 3D Rekonstruktion (ZACH 2008). Methoden zur Fusionierung von 3D Daten arbeiten entweder direkt mit ungeordneten Punktwolken wie bei BERNARDINI (1999), KAZHDAN (2006), LABATUT (2009), oder auf diskreten Volumina. In diesem Fall können robuste Methoden der globalen Energieminimierung, wie zum Beispiel Total Generalized Variation (TGV), herangezogen werden, um Ausreißer zu unterdrücken, und fehlende Bereiche aufzufüllen (POCK 2011).

2.2.4 Visualisierung und Management großer Datenmengen

Generell existieren zahlreiche Softwarewerkzeuge, um Geodaten zu verwalten und darzustellen. Beispiele hierfür sind GIS Werkzeuge wie Quantum GIS (www.qgis.org), ArcGis (www.arcgis.com), Grass GIS (grass.osgeo.org), welche speziell für die Darstellung und Manipulation von 2D Raster- und Vektordaten konzipiert sind. Big-Data GIS Systeme wie Google Earth (earth.google.com) und Microsoft Bing Maps (www.bing.com/maps) erlauben eine 3D Darstellung, stellen jedoch wenig Anspruch auf räumliche Genauigkeit und Detail, sondern konzentrieren sich auf übersichtliche und ästhetische Darstellung.

Produkte, welche die 3D Visualisierung und Analyse ermöglichen, sind noch weniger verbreitet. Ein Beispiel ist World Wind (worldwind.arc.nasa.gov), jedoch skalieren diese Lösungen nicht auf sehr große Datensätze, ohne entsprechende Rechnerausstattung.

Im Bereich der Photogrammetrie ist Big-Data Visualisierung ein aktives Forschungsgebiet. Digitale Luftbilder und moderne Photogrammetrie-Software erlauben es, dichte Oberflächenmodelle über große Flächen zu erzeugen (LEBERL 2012). Terrestrische Laserscanner und Mobile-Mapping Systeme ermöglichen die Erfassung ganzer Städte aus Fußgänger-Perspektive (KANG 2011), (NEBIKER 2010). Systeme der Nahbereichs-Photogrammetrie ermöglichen die Erstellung von Gebäude- und Stadtmodellen auf Basis von UAV Bildern. Die erzeugten Daten übersteigen schnell die 10 GB Marke und können mehrere Terabytes erreichen, eine Menge, die für herkömmliche 3D Programme nicht mehr handhabbar ist. Bei RICHTER (2014) wird eine Service-orientierte Systemarchitektur zum Speichern, Managen und Visualisieren von großen 3D Punktwolken vorgestellt. Der Forschungsinhalt ist hier die Systemarchitektur für Produktion, Speicherung und Datenvisualisierung.

Der Algorithmus QSplat von RUSINKIEWICZ (2001) ist eine etablierte Methode, um große Mengen von Punktdaten zu visualisieren. Punkte werden hierbei als Kugeln variabler Größe visualisiert, in Abhängigkeit ihres Abstandes zum Beobachtungspunkt. Da nahe Punkte die weiter entfernten schnell verdecken, ermöglicht diese Vorgehensweise eine massive Datenreduktion während der Visualisierung. Durch effiziente Suchalgorithmen werden Punkte in Echtzeit nach deren Abstand vom Beobachter sortiert.

In PAJAROLA (2005) erweitern die Autoren den Algorithmus zu einem System, welches einen direkten Datenstrom von Festplatte bis Bildschirm herstellt, und somit die Abhängigkeit der Visualisierung von der Rechner-Ausstattung minimiert. In (BETTIO 2009) wird ein Client-Server System vorgestellt, um mit großen 3D Scans zu interagieren. Der Fokus hierbei liegt auf terrestrischen Laserscans von Kulturgütern.

In ELSEBERG (2011) wird eine Octree-Repräsentation der Daten benutzt, um 3D Daten auf mobilen Robotern effizient zu verwalten. In GOSWAMI (2010) werden hingegen nicht-binäre KD-Baumstrukturen benutzt, um eine bessere Balancierung der Suchkomplexität zu erreichen.

LEITE (2009) stellt ein Punkt-basiertes Visualisierungs-System vor, welches ebenfalls auf einem KD-Baum basiert. Dieser ist jedoch auf Grafikprozessoren lauffähig. Dementsprechend ist deren Leistungsfähigkeit höher, jedoch durch den verfügbaren Arbeitsspeicher auf der Grafikkarte limitiert.

Anstatt reiner Punktinformation, werden von PFISTER (2000) sog. Surfels als Darstellungs-Primitiva benutzt. Dadurch wird in vielen Fällen eine realistischere Visualisierung erreicht, da Surfels auch Information über Normalrichtung und Textur enthalten.

In ZWICKER (2001) entwickelten die Autoren ein Point-Rendering System basierend auf dem Elliptical Weighted Average (EWA) Filter im Bildraum. Eine Gauss-Verteilung wird in den Bildraum projiziert, was eine Ellipse ergibt, welche mit einem Tiefpassfilter gefaltet wird. Dadurch werden Farbartefakte und Flimmereffekte in der Visualisierung unterdrückt. Auf diese Weise können auch halbtransparente und transparente Objekte dargestellt werden.

Ein Partikel-basiertes System für Rendering und Simulation auf Grafikprozessoren (GPU) wird von LEACH (2014) vorgestellt. Die Autoren simulieren lokale kinetische Prozesse auf großen Landschaften in Echtzeit. Die Publikation zeigt die generelle Machbarkeit eines solchen Systems.

Als weiterführende große Herausforderung kann die Datenvisualisierung über das Internet angesehen werden. In EVANS (2014) wird ein WebGL-basiertes Renderingssystem für Punktwolken präsentiert. Es ist optimiert auf LIDAR Daten und ermöglicht Visualisierung und Kollaboration über das Web. MAENO (2012) visualisiert Punktwolken durch adaptive Klassifizierung und adaptive Wahl des Rendering Modus. Das Rendering System wechselt automatisch zwischen Splats, Liniensegmenten und Dreiecksnetzen zur Visualisierung, basierend auf einer Klassifizierung der Punktewolke. Luftgestützte LIDAR Scans werden in GAO (2014) visualisiert, wo diese als Quadrees organisiert werden und in mehreren Detailgraden gespeichert werden. Lokale Bereiche werden zu Ebenensegmenten zusammengefasst, um eine weitere Datenreduktion zu erreichen.

3 Methodik

3.1 Befliegung

Ziel des Projektes war es, das Hauptgebäude des Schlosses Eggenberg an seinen Außenseiten und Innenhöfen zu rekonstruieren und die Ergebnisse als 3D Punktwolke und als Orthobilder zu speichern.

Das Schloss umfasst grob eine Grundfläche von 66 m x 81 m. Es besitzt vier Außenfassaden, begrenzt von vier Ecktürmen. Im Inneren befinden sich drei Höfe, und ein Uhrturm im Zentrum.



Abb. 1:
Orthobild von Schloss Eggenberg. Quelle:
Stadt Graz, Geoportal

Demnach lässt sich das Gebäude grob in folgende Bereiche einteilen: vier Fassaden außen, Dachbereich, drei Innenhöfe mit je einem Boden und vier Wänden. Speziell die kleineren Innenhöfe erwiesen sich als Herausforderung, da eine GNSS-basierte Navigation des UAV dort nicht möglich war, und das UAV durch seine eigenen Turbulenzen unruhig flog. Die Innenbereiche sind zum großen Teil als Arkadengänge ausgelegt, von welchen mittels UAV jeweils die hofseitig sichtbaren Bereiche der Säulen erfasst worden sind. Zusätzlich zum Gebäude wurden die sechs Statuen (vier im Vorderbereich, zwei im rückwärtigen Bereich) dreidimensional rekonstruiert. Während die Wandbereiche in einem regelmäßigen Raster befliegen werden können, erweist sich die Dachlandschaft als sehr komplex. Insgesamt

samt müssen fünf Türme und 20 Kamine erfasst werden, sowie die Struktur über dem Haupteingang.



Abb. 2:
Schloss Eggenberg Westansicht. Quelle:
Google Earth

Für die Aufnahme der Fassaden und Dächer wurde eine zertifizierte Drohne, ausgerüstet mit einer hochauflösenden Spiegelreflexkamera verwendet. Die Bildauflösung betrug 16 MPixel. Das Gebäude wurde in acht Bereichen befliegen: vier Außenfassaden, drei Innenhöfe und die Dachlandschaft.

Nach Planung der Befliegung, wurde diese an zwei Tagen durchgeführt. Insgesamt wurde ein Bilddatensatz von 11.780 Bildern (82,6 GB, Auflösung: 4752x3168 Pixel) aufgenommen.



Abb. 3: Beispiele aus dem Bilddatensatz

Die entstandenen Bilder decken alle Bereiche des Gebäudes mit einer Auflösung zwischen 2 mm und 5 mm/Pixel ab.

3.2 3D Modellierung

Als erster Schritt wurden die Kamerapositionen mittels Aerotriangulation verfeinert und Georeferenziert. Der Bilddatensatz wurde auf Basis von Passpunkten, welche von der Stadtvermessung Graz zur Verfügung gestellt wurden, georeferenziert. Die Aerotriangulation wurde automatisch mit der UnlimitedAerial-AT Software errechnet.

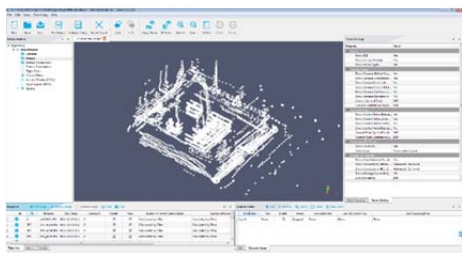


Abb. 4:
Darstellung der Kamera Positionen und Orientierungen in UnlimitedAerial-AT

Der Mittlere Restfehler der Passpunkte ist in der folgenden Tabelle gegeben. Die Aerotriangulation erfolgte anhand von 10 Passpunkten. Zusätzlich wurden 110 Kontrollpunkte geodätisch eingemessen, um den Restfehler zu bestimmen.

Tabelle 1: Mittlere Restfehler der Referenzpunkte

Fassade	Mittlerer Fehler
Front	6,0 mm
Links	9,8 mm
Rechts	4,8 mm
Rück	4,3 mm
Hof1	7,1 mm
Hof2	6,5 mm
Hof3	6,9 mm

Auf Basis der aerotriangulierten Kamerapositionen wurde in einem weiteren Schritt eine dichte Punktwolke mit einer Auflösung von 5 mm berechnet. Dies ergab ein Gesamtmodell mit 13 Mrd. 3D Punkten. Das entstandene Modell kann in freien Softwarepaketen wie CloudCompare visualisiert werden, jedoch ist es nicht mehr einfach handhabbar. Alleine das Betrachten der Daten ist ruckelig und die Ladezeit beträgt mehrere Minuten.

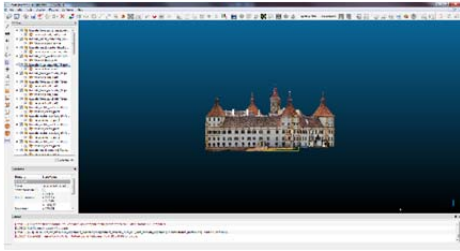


Abb 5:
Visualisierung des 3D Modells in CloudCompare

Aus diesem Grund wurde das Modell in weiterer Folge in das .uds Format konvertiert, so dass es mit dem Software-Paket Euclidean Geovise flüssig dargestellt werden kann. Die Ladezeit für das Modell beträgt danach lediglich 0,5 s und das Modell lässt sich auf einem Standard-Laptop ohne 3D Grafikkarte flüssig betrachten. Als Weiterverarbeitungsschritt können. In diesem Programm können in weiterer Folge Bereiche annotiert werden, Polygonzüge eingezeichnet werden und ein direkter Autocad-Export vorgenommen werden.

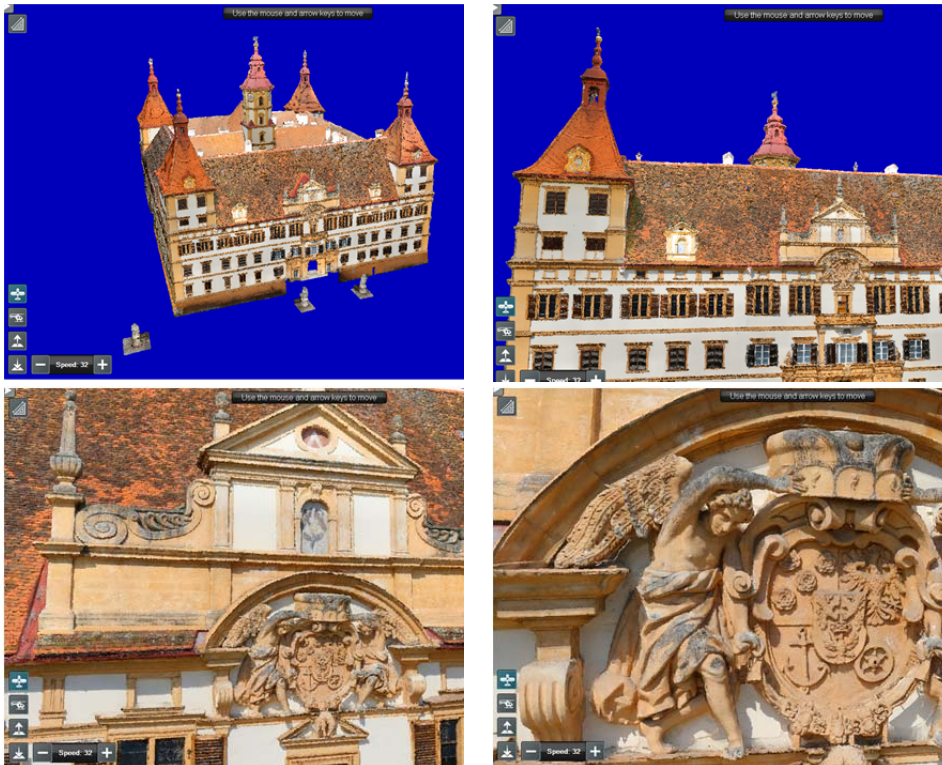


Abb. 6: Visualisierung des 3D Modells in Euclidean Geovise

4 Schlussfolgerung

Im Rahmen des vorgestellten Projektes wurde ein komplexes Gebäude mit einer Grundfläche von 5200 m² und einer maximale Gebäudehöhe von 50 m mittels UAV vollständig dreidimensional erfasst. Das Resultat ist ein dichtes 3D Modell des Komplexes in höchster Auflösung.

Die Flexibilität eines UAV erlaubt es, auch schwer zugängliche Bereiche von Gebäuden zu erreichen. Ein limitierender Faktor ist die begrenzte Flugzeit eines Multicopter-UAV. Bei größeren Projekten muss eine entsprechende Verfügbarkeit an Akkus mit einberechnet werden.

Die photogrammetrische Verrechnung auch großer Bildmengen ist mittlerweile ein gelöstes Problem. Neue Algorithmen und Multi-View Optimierungsverfahren erlauben eine Verdichtung der Punktwolke auch in schwach texturierten Bereichen und erhalten gleichzeitig scharfe Kanten im Modell.

Auch die Darstellung der Ergebnisse gegenüber dem Endkunden ist mittlerweile möglich, ohne die Hardware-Anforderung unnötig hochzuschrauben. Ein UAV kombiniert mit den geeigneten Software-Tools ist somit ein zukunftstaugliches, photogrammetrisches Messsystem.

Literatur

- AGARWAL S. et al. (2009): Building Rome in a Day. In: International Conference on Computer Vision (ICCV). Kyoto, Japan
- BERNARDINI F. et al. (1999): The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. Volume 5 Issue 4, 349-359
- BROWN D. (1976): The bundle adjustment - progress and prospects. In: Int. Archives Photogrammetry. 21(3)
- COX I. et al. (1996): A maximum likelihood stereo algorithm. In: Computer Vision and Image Understanding. 63(3), 542-567
- EVANS A. et al. (2014): Web-based visualization of on-set point cloud data. In: Proceedings of the 11th European Conference on Visual Media Production.
- ELSEBERG J. et al. (2011): Efficient processing of large 3d point clouds. In: Information, Communication and Automation Technologies (ICAT). XXIII International Symposium, 1-7
- GAO Z. et al. (2014): Visualizing aerial lidar cities with hierarchical hybrid point-polygon structures. In: Proceedings of the 2014 Graphics Interface Conference. Canadian Information Processing Society, 137-144
- GOSWAMI P. et al. (2010): High quality interactive rendering of massive point models using multi-way kd-trees. In: Computer Graphics and Applications (PG). 18th Pacific Conference 93-100

- HOPPE C. et al. (2012): Online Feedback for Structure-from-Motion Image Acquisition. In: Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC). Guildford
- KAZHDAN M. et al. (2006): Poisson surface reconstruction. In: Symposium on Geometry Processing 2006. 61-70
- KANG Z. & LU Z. (2011): The change detection of building models using epochs of terrestrial point clouds. In: Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), 1-6
- LEACH C. & MARAIS P. (2014): A gpu-based level of detail system for the real-time simulation and rendering of large-scale granular terrain.
- LEBERL F. et al. (2012): Automated photogrammetry for three-dimensional models of urban spaces. In: Optical Engineering. 51(2):021117-1
- LABATUT P. et al. (2009): Robust and Efficient Surface Reconstruction From Range Data. In: Computer Graphics Forum. Volume 28, Issue 8, December 2009, 2275-2290
- LEITE P. et al. (2009): Massively parallel nearest neighbor queries for dynamic point clouds on the gpu. In: Computer Architecture and High Performance Computing. SBAC-PAD'09. 21st International Symposium on, 19-25
- MAENO T. et al. (2012): Adaptive selection of rendering primitives for point clouds of large scale environments. In: Proceedings of the 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering.
- NEBIKER S. et al. (2010): Rich point clouds in virtual globes—a new paradigm in city modeling? In: Computers, Environment and Urban Systems, 34(6):508-517
- POLLEFEYS M. et al. (2004): Visual modeling with a hand-held camera. In: Int. Journal of Computer Vision. 59 (3), 207-232
- PAJAROLA R. et al. (2005): External memory multiresolution point visualization. In: In Proceedings IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing. 628-633
- POCK T. et al. (2011): TGV-Fusion. In: Maurer Festschrift, LNCS 6570
- PFISTER H. et al. (2000): Surface elements as rendering primitives. In: In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 335-342. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- RICHTER R. & DÖLLNER J. (2014): Concepts and techniques for integration, analysis and visualization of massive 3d point clouds. In: Computers, Environment and Urban Systems. 45:114-124
- RUSINKIEWICZ S. & QSPLAT M. (2000): A multiresolution point rendering system for large meshes. In: In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 343-352. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- ROTHERMEL M. et al. (2012): SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. In: Proceedings LC3D Workshop, Berlin
- SEITZ S. et al. (2006): A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. In: Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1, 519-526

- SCHARSTEIN D. & SZELISKI R. (2002): A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In: *International Journal of Computer Vision*. 47(1/2/3):7-42
- SCHARSTEIN D. et al (2001): A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In: *Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (in conjunction with IEEE CVPR 2001)*, 131-140, Kauai, Hawaii
- WU C. et al. (2015): Multicore Bundle-Adjustment. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*
- ZACH C. (2008): Fast and High Quality Fusion of Depth Maps. *International Symposium on 3D Data Processing*. In: *Visualization and Transmission (3DPVT)*
- ZWICKER M. et al. (2001): Surface splatting. In: *In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 371–378
- ZEBEDIN L. (2010): Fusion of Area Based and Feature Based Data Sets for Urban Site Reconstruction. In: *PhD thesis, Graz University of Technology*