

DISS. ETH NO. 18515

UAV Photogrammetry

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

HENRI EISENBEIß

Dipl.-Ing., University of Technology Dresden

born 31st of December 1977

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Armin Grün, examiner

Zurich, Switzerland

Prof. Dr. Impyeong Lee, co-examiner

Seoul, Korea

2009

ABSTRACT

UAVs are unmanned aerial vehicles. Hence, UAV photogrammetry can be understood as a new photogrammetric measurement tool. UAV photogrammetry opens various new applications in the close range domain, combining aerial and terrestrial photogrammetry, but also introduces low-cost alternatives to the classical manned aerial photogrammetry. This thesis deals with the challenging task: “*The use of UAV systems as photogrammetric data acquisition platforms*” and the work was conducted by the author at IGP at ETH Zurich from 2003 to 2009.

In this work, a new terminology, *UAV Photogrammetry*, was introduced. UAV Photogrammetry describes photogrammetric measurement platforms, which operate as either remotely controlled, semi-autonomously, or autonomously, all without a pilot sitting in the platform, and the photogrammetric processing of UAV images. The broad definition covers balloons, kites, gliders, airships, rotary and fixed wing UAVs with the capability for photogrammetric data acquisition in manual, semi-automated and automated flight mode. To more clearly define UAVs, a comprehensive literature review on UAVs used in photogrammetry will be given. Using the existing categorizations of UAVs, the outcome of the literature review and our experiments, a new classification for UAVs, with respect on low-cost and high-end systems, the real-time processing capability (based on the integrated sensors and the flight performance, as well as the influence of environmental conditions), was provided. For this work, UAV systems, based on the new classification, will be selected to demonstrate how UAVs can be applied for photogrammetric data acquisition and processing.

In addition to the revised definitions and classifications of UAVs, we have devised a new generic workflow for the photogrammetric UAV flight planning, image acquisition, quality control and data processing. This workflow can specifically be adapted to individual UAV-systems and applications. Thus, specific tools, such as flight planning, are developed. Based on our results, UAV flight control systems and the flight operations were improved and commercial and in-house developed software packages were additionally evaluated for the processing of UAV image data. The proposed workflow allows the combination of office and field work, enabling the first results to be available during the field work for preliminary

analysis.

This dissertation also emphasizes the influence of the manual, assisted and autonomous control of the UAV system on the flight performance during the data acquisition, which in turn influences the results and the feasibility of the photogrammetric data processing. Therefore, an autonomous tachymeter tracking of the flight trajectory was performed firstly with an UAV system. A test field for UAVs was then established at the campus Höggerberg at ETH Zurich. This test field enables us to assess the flight performance of various UAV systems. Specifically, an UAV system combined with a light weight laser scanner acquired a DSM over our test field.

Complementary to the developed workflow the accomplished real world application, this work has shown the great potential of using UAVs in photogrammetry and upcoming applications. The focus of our applications was particularly on archaeology and environmental applications, which allowed us to prove our established workflow and to underline the high potential of UAV systems for specific photogrammetric tasks, specifically the use of autonomous operated and stabilized UAV systems.

- In the frame of the Nasca/Palpa project, the pre-Inca settlement Pinchango Alto (Peru) was documented with our autonomous flying model helicopter. For the first time an accurate and dense elevation model (10cm resolution) of an archaeological site was generated automatically using our in-house developed software. A detailed analysis of the generated data was done using terrestrial laser scanning data. The comparison of both data sets showed that the mean difference between the elevation models was less than 1cm with a standard deviation of 6cm.
- The world heritage Maya site Copán (Honduras) was documented with our system in 2009. The preliminary results, achieved directly after the data acquisition, underlined the expectations and potentials for up-coming archaeological analysis and investigations.
- The castle Landenberg was documented with 1cm resolution using terrestrial and UAV images.
- In the framework of this dissertation, the rockslide Randa (Switzerland) was documented with LiDAR and image data taken from a manned helicopter. The results from the manned system were compared to the observed data from a UAV for a small part of the rockslide. The elevation model generated from the UAV image data had a substantial higher resolution and showed less occlusions than the LiDAR data. These differences result from the possibility to acquire image data close to the rockslide using an autonomous operated UAV, without endangering human life, and using a specific flight planning tool for UAVs in mountainous areas. This particular application showed also the

limitations of existing UAVs in the data acquisition in Alpine areas, due to the high altitudes. However recent developments of new UAV systems are now ready in future work to operate in Alpine areas.

- Using a quadrotor, equipped with a light weight compact camera, it was possible to generate elevation models of a gravel pit at different time periods (February and April). The image data was acquired in the semi-automated and automated mode, allowing an estimation of the volume dug from the pit over time.
- An UAV was used in a study for the evaluation of genetically modified maize (simulated) on conventional maize. High resolution elevation models and orthoimages were produced from two campaigns. The generated spatial data was integrated into a GIS and then used with measures for the out-crossing in maize, to analyse the inclination, height, distance and wind on the influence of cross-pollination in maize.

Finally, based on the experimental results, a new particular workflow for combination of image and LiDAR sensors on one UAV platform was provided.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Begriff UAV steht für unbemannte Luftfahrzeuge, somit kann UAV Photogrammetrie als neue photogrammetrische Aufnahmemethode unter Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen aufgefasst werden. Die Verwendung von UAV Photogrammetrie erlaubt neue Anwendungen im Nahbereich und in der Kombination von Luftbild- und Nahbereichsphotogrammetrie. Mit UAVs ergeben sich low-cost Alternativen zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der „*Verwendung von UAV-Systemen (unbemannte Luftfahrzeuge) als photogrammetrische Datenakquisitionsplattform*“ und wurde in der Periode von 2003 bis 2009 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich vom Autor der Arbeit verfasst.

In dieser Arbeit wird der Begriff UAV-Photogrammetrie neu eingeführt. Er beschreibt ein photogrammetrisches Aufnahmesystem, welches manuell, halbautomatisch oder automatisch gesteuert und kontrolliert werden kann und die photogrammetrische Auswertung von UAV Bildern. Das heisst, es ist kein Pilot an Bord des Systems.

Die Systeme beinhalten Ballons, Drachen, Gleitschirme, Luftschiffe, Hubschrauber, Quadkopter und Flächenflieger. In diesem Zusammenhang wird eine umfassende Literaturübersicht gegeben, die UAVs mit Anwendungen in der Photogrammetrie darstellt.

Unter Verwendung vorhandener Klassifizierungen von UAVs anhand der vorliegenden Literaturstudie und den durchgeführten Experimenten für diese Arbeit sind neue Klassifikationsmethoden für UAVs definiert. Diese Klassifikationen unterscheiden zwischen low-cost und high-end Systemen und der Kapazität für den Echtzeitprozess in Abhängigkeit vom implementierten Sensor und Umwelteinflüssen.

Es wurden verschiedene UAV-Systeme für die Untersuchungen auf ihre Anwendbarkeit von UAV-Systeme als photogrammetrische Datenakquisitionsplattformen ausgewählt. Basis bildeten spezifische gegebene Klassifikationen. Die ausgewählten Systeme werden in dieser Arbeit vorgestellt und untersucht. Zudem wurde ein allgemeiner Workflow für die Flugplanung, Akquisition und Prozessierung von UAV-Bilddaten entwickelt. Abhängig vom UAV-System und dessen Anwendung kann der Workflow an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Dafür wurden spezielle Tools, wie zum Beispiel Bildflugplanung für

UAVs entwickelt. Basierend auf den erzielten Ergebnissen sind die Flugsteuerungssysteme angepasst, das Flugverhalten verbessert und kommerzielle sowie am IGP entwickelte photogrammetrische Softwarepakete für das Prozessieren von UAV-Bilddaten analysiert worden. Der generierte Workflow ermöglicht die Kombination von Feld- und Büroarbeiten, so dass die Ergebnisse für erste Analysen im Feld verwendet werden können.

Diese Arbeit beschäftigt sich auch mit dem Einfluss von manueller, halbautomatisch und automatisch durchgeführter Steuerung auf die Flugeigenschaften der UAV-Flüge und die photogrammetrische Auswertbarkeit der erfassten Bilddaten. Das Flugverhalten und die Positionierungsgenauigkeit einer UAV-Plattform werden damit erstmalig mittels automatischer Verfolgung und Messen mittels eines Tachymeters durchgeführt. Für diese Analysen wurde ein Testfeld am Campus Höggerberg der ETH Zürich angelegt. Dieses Testfeld erlaubt die Untersuchung der Flugtrajektorie und –performance von verschiedenen UAVs. Zusätzlich zu der Untersuchung mit dem Tachymeter konnten mit einem Laserscanner integriert an einem UAV ein Höhenmodell vom Testfeld generiert werden.

Ergänzend zum entwickelten Workflow sind im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Anwendungen mit UAVs in der Photogrammetrie in den letzten 5 Jahren durchgeführt worden. Die Ergebnisse zeigen das grosse Potential der Plattformen für die Verwendung in der Photogrammetrie und zukünftigen Anwendungen auf. Der Fokus bei den Anwendungen wurde dabei auf die Archäologie und auf die Dokumentation unserer Umwelt gelegt. Die durchgeführten Anwendungen erlaubten die Bestätigung des generierten Workflows und betonten das grosse Potential von UAV-Systemen (besonders für autonome und stabilisierte Systeme) für ausgewählte photogrammetrische Aufgaben.

- Im Rahmen des Nasca-Palpa Projektes wurde die Prä-Inka Siedlung Pinchango Alto (Peru) mit einem autonom fliegenden Modellhelikopter dokumentiert. Zum ersten Mal konnte ein genaues und hochaufgelöstes (10cm Auflösung) Höhenmodell einer archäologischen Siedlung automatisch mit einem am Institut entwickelten Softwarepaket generiert werden. Das berechnete Höhenmodell wurde mittels eines mit terrestrischen Laserscanning generiertem Höhenmodell detailliert analysiert. Die Differenz der beiden Höhenmodelle ergab einen mittleren Offset von weniger als einem Zentimeter und einer Standardabweichung von sechs Zentimeter.
- Die zum UNESCO Weltkulturerbe zählende Maya Tempelanlage Copán (Honduras) wurde mit dem gleichen UAV-System im Rahmen von Feldarbeiten im April 2009 dokumentiert. Die ersten Ergebnisse direkt nach der Datenaufnahme bestätigen das grosse Potential der UAV-Bilddaten für zukünftige archäologische Arbeiten.

- Das Schloss Landenberg wurde mit einer Auflösung von einem Zentimeter mittels kombinierter Auswertung von terrestrischen und UAV-Bilddaten aufgenommen.
- Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde der Felssturz bei Randa (Schweiz) mit luftgestütztem LiDAR und Bilddaten von einem bemannten Helikopter aufgenommen und ist somit dokumentiert. Die vom bemannten Flug aus generierten Daten wurden für ein kleineres Gebiet zusätzlich auch mittels UAV-Bilddaten aufgenommen. Aufgrund der präzisen Planung in steilem Gebiet erlaubte das verwendete UAV nahe am Objekt zu operieren ohne menschliches Leben zu gefährden. Jedoch zeigte das Projekt unter anderem auch die Grenze von UAV-Flügen in höheren Lagen der alpinen Gebiete. Neuere technische Entwicklungen zeigen jedoch, dass UAV-Systeme verbessert werden können, so dass diese in zukünftigen Arbeiten in diesen Regionen eingesetzt werden können.
- In einem weiteren Projekt wurden mittels Bilddaten, aufgenommen von einer Kompaktkamera von einem Quadkopter, zwei Höhenmodelle einer Kiesgrube zu verschiedenen Zeitpunkten generiert. Die Bilddaten konnten halbautomatisch und automatisch aufgenommen werden. Mittels der generierten Daten ist eine Volumenabschätzung des abgebauten Gebietes durchgeführt worden.
- Ein Beispiel aus der Agronomie beschäftigt sich mit der Untersuchung des Einflusses von genmodifiziertem Mais (simuliert) auf natürlichen Mais. Dafür wurden von Maisfeldern in zwei Messkampagnen Höhenmodelle und Orthobilder generiert. Die erzeugten Daten wurden gemeinsam mit der Auskreuzungsrate in ein GIS (Geographisches Information System) integriert und der Einfluss des transgenen Mais auf natürlichem Mais im Bezug auf Neigung, Höhe, Distanz und Windeinflüsse analysiert.

Abschliessend wurde mit den gewonnen Ergebnissen aus den Experimenten ein Workflow für die Kombination von LiDAR- und Bildsensoren für ein UAV-System gegeben.