

UAV-Photogrammetrie

Definition



Die UAV-Photogrammetrie erfasst geometrische und bildlich-*semantische* Objektzustände mit einem unbemannten Luftfahrzeug (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), das mit einer kleinformatischen Kamera für die Erstellung von Bildaufnahmen aus der Luft ausgestattet ist. Methodisch ist das Verfahren eng an die klassische Luftbildphotogrammetrie angelehnt und liefert in erster Linie bildbasierte Punktwolken, 3D-Oberflächenmodelle und Orthophotos als Ergebnis (Luhmann 2018 S. 24).

Anwendungsfall

Anwendungsbereich



- Befliegungen mit einem Unmanned Aerial Vehicle (UAV, „Drohne“), das mit einer Kamera für flächenhafte Erfassungen und Erstellung von 3D-Oberflächenmodellen ausgestattet ist
- Vermessung und Überwachung von hohen bzw. schwer zugänglichen Bauwerken
- Generierung von dreidimensionalen Oberflächenmodellen
- Schadensdetektion von Rissen ab 0,5 mm Rissweite, Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen
- Visuelle Identifikation von Schäden
- Vermessung visuell identifizierbarer Schäden

Rahmenbedingungen



- Die Aufnahmesensorik (Kamera und Objektiv) bedingt die Ausleuchtung der Objekte durch natürliches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.
- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Objekten mit einer Größe bis zu ca. 100 m.
- Bei der UAV-Befliegung sind die rechtlichen Bestimmungen der Luftverkehrsordnung zu beachten (LuftVO 2021).
- Einsetzbare Kameratechnik von der Nutzlastkapazität des Fluggerätes abhängig.

(Luhmann 2018 S. 606)

Technischer Hintergrund

Erläuterung der Funktionsweise



Als unbemannte Luftfahrzeuge werden vorwiegend senkrecht startende Multikoptersysteme in unterschiedlichen Nutzlastklassen eingesetzt, die mit Kameras für photogrammetrische Zwecke ausgestattet sind. Für die *Bildorientierung* sowie Georeferenzierung werden vorbereitend Passpunkte (d.h. Punkte mit bekannten Koordinaten) eingerichtet und eingemessen. Bei der Bilddatenerfassung können neben den typischen Senkrechtaufnahmen in Nadirrichtung auch Schrägaufnahmen für die Untersuchung von Bauwerken erstellt werden. Die manuell oder Flugrouten gesteuerten

UAV-Befliegungen der überwiegend flächenhaften Objekte erfolgen systematisch mit hohen Überdeckungsgraden von 60 bis 95 % (Längs- und Querrichtung), wobei *Bildverbände* mit bis zu mehreren hundert Bildern entstehen. Das wichtigste Ergebnis der UAV-Photogrammetrie sind bildbasierte Punktwolken. Die Auswertung der Aufnahmen und die Ableitung der Punktwolken aus den dichten Bildverbänden sind durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet. Die Gewinnung der (hochdichten) Punktwolken geschieht durch dichte Bildzuordnung (Dense Image Matching). Die 3D-Koordinaten der Objektpunkte ergeben sich vom Grundsatz her – wie in der klassischen RGB-Photogrammetrie – auf der Grundlage des photogrammetrischen *Triangulationsprinzips*.

(Luhmann 2018 S. 24, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 102, Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 332)

Mehrwert

Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Die Untersuchung von schwer zugänglichen Objekten (z.B. Hochbauwerke) wird erleichtert.
- Einschlägige rechtliche Vorschriften der Luftfahrt sind zu beachten und führen zu Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten.
- Kurze, bzw. keine Aufenthaltszeiten bei der Erhebung in Gefahrenzonen vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit.

Zeitersparnis Inspektion



- Die Zeitersparnis ist durch die flexiblen Einsatzmöglichkeiten und den hohen Automatisierungsgrad bei der Ableitung von hochdichten Punktwolken und 3D-Oberflächenmodellen signifikant gegeben. Ein UAV-Projekt in der Größe z.B. einer Schleuse beansprucht 1,5 bis 2 Tage.
- Wenn aus den Punktwolken weitere geometrische Strukturinformationen (Punkte, Kanten etc.) bestimmt werden sollen, führt dies zu ähnlichem Zeitaufwand wie die (manuelle) Auswertung von Bildern in der RGB-Photogrammetrie.

Kosten



- Erfassungssensorik (UAV und Kamera): ca. 3.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig von Nutzlast und Kameratechnik, Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 2.000,- bis 10.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

Datenqualität



- Die bildbasierten Punktwolken repräsentieren die geometrischen Objekteigenschaften, hauptsächlich der Objektoberfläche, mit Punktabständen im Subzentimeterbereich.
- Die Aufnahmen selbst dokumentieren zusätzlich die bildlich-*semantischen* Objekteigenschaften.
- Die geometrische *Genauigkeit* hängt neben der Aufnahmeanordnung und dem *Bildmaßstab* hauptsächlich vom Überdeckungsgrad der Aufnahmen ab. Bei der Lagegenauigkeit ist vom 0,5- bis 0,75-fachen und bei der Tiefenmessgenauigkeit vom 1,0 bis 2,0-fachen der Pixelauflösung am Objekt auszugehen.

(Luhmann 2018 S. 117, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 161)

Voraussetzungen

Hardware



- Batteriebetriebene Flugdrohne (UAV) mit Steuerungshardware und -software
- Leichtgewichtige Kamera
- Geodätisches Messinstrumentarium (Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)/Tachymeter) für die Einmessung von Passpunkten
- *Zielzeichen* für die Signalisierung von Passpunkten
- Für die Berechnung der Punktwolken: Computer mit hoher Leistung (z.B. i7-Prozessor, 64 GB RAM Arbeitsspeicher, Grafikprozessor mit Hardwarebeschleunigung)
- Auswertesoftware für Bestimmung von bildbasierten Punktwolken

Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes notwendig
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten

Vorbereitung Datenerhebung



- Definition der angestrebten 3D-*Genauigkeit* in der Auswertung; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Flugtrajektorien
- Auswahl der Sensorauflösung (Pixelanzahl der Kamera) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit und Bodenpixelauflösung (Pixelgröße am Objekt)
- Auswahl der Kamera-Objektiv-Kombination im Hinblick auf den erforderlichen (durchschnittlichen) *Bildmaßstab*
- Festlegung von Belichtungszeit und Blendeneinstellung vor dem Hintergrund der gegebenen Lichtverhältnisse, erforderlichen *Tiefenschärfe* und zu erwartenden Bewegungsunschärfen
- Festlegung von Überdeckungsgrad (Überlappung benachbarter Aufnahmen) und Anzahl der Aufnahmen im Hinblick auf die angestrebte *Genauigkeit* und Punktwolkendichte

(Luhmann 2018 S. 613, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 114)

Umweltbedingungen



- Normales Tageslicht stellt gewöhnlich ausreichende Lichtverhältnisse sicher mit Spielraum in den Kameraeinstellungen
- Trockene Witterungsverhältnisse erforderlich
- Einsatzbeschränkungen bei Wind gemäß Angaben des UAV-Herstellers (Max. ca. 10 m/s)

Erforderliche Genehmigungen



- Keine Genehmigungen erforderlich, sofern die einschlägigen Gewichts- und Abstandsgrenzen für den erlaubnisfreien UAV-Betrieb gemäß Luftverkehrsverordnung eingehalten sind; andernfalls Einholung der Erlaubnis bei den Luftfahrtbehörden der Länder.
- Steuerer eines UAV muss über einen besonderen Kenntnissnachweis verfügen („Drohnenführerschein“)

(LuftVO 2021)

Umsetzung

Datenerhebung



- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte
- Durchführung der UAV-Befliegung und Erstellung der Aufnahmen gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

(Luhmann 2018 S. 358, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 114)

Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte
- Durchführung der Bildauswertung und Generierung der bildbasierten Punktwolken
- Nachbereitung der Punktwolken (Fehlerbereinigung, Ausdünnung etc.)
- Ableitung von Folgeprodukten aus den UAV-Punktwolken: Dreiecksvermaschung, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit und ohne Texturierung, Orthophotos/RGB-Bildpläne
- Profilerfassung in den Punktwolken anhand von horizontalen/vertikalen/schrägen Schnittebenen
- Erfassung von geometrischen Objekteigenschaften in den Punktwolken in Form von Ecken, Kanten und Ebenen

- 3D-Modellierung von Bauwerken, fallweise in Kombination mit Objektbildung für Building Information Modeling (BIM) (überwiegend manuell)

(Luhmann 2018 S. 299, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 319, Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 392)

Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Die UAV-Photogrammetrie ist vorteilhaft mit dem Laserscanning kombinierbar; beide Verfahren liefern Punktwolken als primäres Ergebnis, die sich ergänzen können.

Output

Informationen



- Dichte, bildbasierte Punktwolken
- 3D-Oberflächenmodelle
- Orthophotos
- Schnittpläne
- 3D-Bauwerksmodelle

Dateiformate



- Aufnahmen in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Alle gängigen Datenformate für die Speicherung von Punktwolken (LAS, E57 etc.)
- Ergebniskoordinaten: ASCII
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

Referenzen

Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, www.gia.rwth-aachen.de)
- PHOCAD GmbH (www.phocad.de)
- Abteilung Wasserbau BAW (<https://www.baw.de/DE/wasserbau/wasserbau.html>)

Beispielanwendungen

- Segmentierung von Punktwolken für die Bauteilmodellierung (Martens/Blankenbach 2021)
- UAV in der Ingenieurvermessung (Schmechtig 2017)
- Bestimmung von Punktwolken, 3D-Oberflächenmodellen und Orthophotos für Renaturierungsplanungen am Entwässerungskanal Deichverband Kleve (Geodätisches Institut RWTH Aachen, unveröffentlicht)

Quellen

- Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen – Methoden – Beispiele. Wichmann Verlag, Berlin Offenbach (2018)
- LuftVO: Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten vom 14. Juni 2021. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I 1766 Nr. 32, Bonn.
- Martens J./Blankenbach B.: VOX2BIM – A Fast Method for Automated Point Cloud Segmentation. In: Procs. EG-ICE 2021 – Workshop on Intelligent Computing in Engineering, 30.06-02.07.2021, TU Berlin (2021)
- Schmechtig O.: UAV in der Ingenieurvermessung – Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017), 156. DVW Seminar, Stuttgart (2017)
- Wiggenhagen M./Steensen T.: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichmann Verlag Heidelberg (2021)
- Witte B./Sparla P./Blankenbach J.: Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach (2020)

Glossar:

- Bildmaßstab:** Verhältnis von Kamerakonstante (Objektivbrennweite) zur Aufnahmeentfernung. Der Bildmaßstab beeinflusst maßgeblich die erzielbare Messgenauigkeit und sollte möglichst groß sein.
- Bildorientierung:** Mit der Bildorientierung wird die Aufnahmesituation mathematisch rekonstruiert. D.h. die Positionen und Rotationen (Drehungen) der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme (die sog. Posen) werden nachträglich rechnerisch bestimmt. Die Bildorientierung ist elementare Voraussetzung dafür, dass in den Aufnahmen des *Bildverbandes* gemessen werden bzw. die Auswertung stattfinden kann. Das Ergebnis der Bildorientierung sind die Daten der Inneren Orientierung (Kameradaten) und Äußerer Orientierung (Posen).

Bildpaar/Bildverband:	Die photogrammetrischen 3D-Messungen basieren auf dem Triangulationsprinzip (s.u.). Hierzu müssen Aufnahmen von unterschiedlichen Standorten mit überlappenden Bildbereichen vorliegen, die in ihrer Gesamtheit den Bildverband formen. Zwei Aufnahmen bilden ein Bildpaar; sind die Aufnahmen in Stereoanordnung erstellt, sind die Voraussetzungen für Stereoauswertungen (unter räumlicher Betrachtung der Szene) gegeben.
Genauigkeit:	Die erzielbare Genauigkeit hängt in der Photogrammetrie im Wesentlichen von den Faktoren Bildmaßstab, Bildanzahl, Schnittgeometrie der Bildstrahlen und Bildmessgenauigkeit ab. Die photogrammetrische Punktbestimmung basiert auf dem Triangulationsprinzip, weshalb die (absoluten) Genauigkeitsangaben in metrischen Dimensionen etwa wie Millimeter oder Zentimeter daher immer im Verhältnis zur Objektgröße gesehen werden müssen. Hierbei wird das Genauigkeitsmaß (Standardabweichung) ins Verhältnis zur (maximalen) Objektausdehnung gesetzt. Ein Beispiel wäre eine Angabe wie 1 : 8.000; bei einer Objektgröße von 15 m wäre in diesem Fall mit einer (absoluten) Genauigkeit von etwa 2 mm zu rechnen.
Semantische Eigenschaften:	Neben der Geometrie beherbergen die Aufnahmen die Informationen über die semantischen Eigenschaften der Objekte. Diese werden durch Bildinterpretation zum Zwecke der Objektbildung erfasst und umfassen die inhaltlichen Objekteigenschaften (Attribute) wie beispielsweise der Baustoff oder die Konstruktionsart.
Tiefenschärfe:	Bei der Erstellung der Aufnahmen ist neben der richtigen Belichtung dafür zu sorgen, dass alle Objektbereiche scharf abgebildet sind. Der Entfernungsbereich zwischen dem vordersten und dem hintersten scharf abgebildeten Objektpunkt ist die Tiefenschärfe (alternative Bezeichnung: Schärfentiefe). Die Tiefenschärfe hängt ab von Blende, Brennweite und Aufnahmeabstand. Vor allem bei Nahaufnahmen kann die Sicherstellung der Tiefenschärfe problematisch sein.
Triangulationsprinzip:	Die photogrammetrische Punktbestimmung basiert auf dem Triangulationsprinzip. Hierbei erfolgt die Punktbestimmung rechnerisch durch das Vorwärtseinschneiden von orientierten Bildstrahlen. In allen Bildern (erforderlich sind mindestens zwei), in denen der zu bestimmende Objektpunkt abgebildet ist, werden hierfür die Bildkoordinaten gemessen, woraus dann in Verbindung mit den aus der Bildorientierung bekannten Daten der Inneren Orientierung (Kameradaten) und Äußerer Orientierung jeweils Lage und Richtung des abbildenden Strahls im Raum rekonstruiert werden. Durch den Vorwärtsschnitt – also das Verschneiden – dieser Raumgeraden gelangt man dann zu den 3D-Koordinaten des Objektpunktes.
Zielzeichen:	Mit Zielzeichen (Zielmarken) werden Objekte bzw. Objektpunkte künstlich signalisiert. Üblich sind kreisförmige, kugelförmige und linienhafte Zielzeichen, optional mit retro-reflektierenden Eigenschaften. Wichtige Einsatzzwecke sind die Bereitstellung von eindeutigen Objektpunkten für Vergleichsmessungen und die Steigerung der Bildmessgenauigkeit für Deformationsmessungen. Künstliche Zielzeichen sind häufig mit einem eindeutigen Muster für die Kodierung der

Punktnummer ausgestattet, was die automatische Punktidentifizierung ermöglicht.