

RGB-Photogrammetrie

Definition



Photogrammetrie ist ein Verfahren zur Bestimmung von Gestalt, Form und Lage von dreidimensionalen Objekten aus (RGB-)Bildern. Die Photogrammetrie ist ein berührungsloses Mess-verfahren und kann überall dort eingesetzt werden, wo ein Objekt fotografisch abgebildet und ausgewertet werden kann

(Luhmann 2018 S. 24).

Anwendungsfall

Anwendungsbereich



- Geometrische und inhaltliche Dokumentation von dreidimensionalen Objekten mit einfacher (1:1.000) bis höchster (1:100.000) (relativer) Genauigkeit.
- Qualitative und quantitative Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von Verformungen, insbesondere über die Zeit.
- Vielfach einsetzbar im Massiv- und Stahlbau für Objekte mit beliebiger Größe.
- 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) bedingt die Ausleuchtung der Objekte durch natürliches oder künstliches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich.
- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer detaillierten Erfassung mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.
- Die Objekte sind möglicherweise nur schlecht zugänglich bzw. es herrscht vor Ort ein hohes Gefahrenpotenzial (zum Beispiel Industrieanlagen).
- Vor Ort sind möglichst kurze Messzeiten gewünscht oder erforderlich (zum Beispiel Wasserbauwerke mit Zugangsbeschränkungen aufgrund hochfrequentem Betrieb).

(Luhmann 2018 S. 606)

Technischer Hintergrund

Erläuterung der Funktionsweise



Das zu untersuchende Objekt wird mit einer RGB-Kamera von verschiedenen Standorten und aus unterschiedlichen Richtungen fotografiert, wobei die innere Abbildungsgeometrie der Kamera (vor allem Objektivbrennweite und Fokuseinstellung) unveränderlich sein sollten. Die Kamera kann dabei stationär (z.B. auf einem Stativ am Boden) aufgestellt oder freihändig vom menschlichen Operateur getragen werden. Auch die kinematische Anwendung auf bewegten Plattformen bzw. Fahrzeugen aller Art (vgl. z.B. Steckbrief UAV-Photogrammetrie) ist möglich.

Die Einsatzform (statisch, kinematisch) sowie Anzahl und Anordnung der Bildaufnahmen richten sich nach dem Vermessungszweck; alle zu erfassenden Objektbereiche sollten in mindestens zwei Aufnahmen abgebildet sein. Die Aufnahmearbeiten vor Ort werden ergänzt durch die Bestimmung von zumeist signalisierten Passpunkten (d.h. Punkte mit bekannten Koordinaten) mittels geodätischer Messverfahren wie der Tachymetrie, die für die *Bildorientierung* benötigt werden. Die digitalen Aufnahmen entstehen nach dem Gesetz der Zentralperspektive und gehen als Einzelbilder, Bildpaare (Stereobilder) oder Bildverbände in die Bildauswertung bzw. Bildanalyse ein (Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 357). Als elementare Voraussetzung der Bildauswertung muss zunächst die *Bildorientierung* durchgeführt werden, die manuell oder – mit entsprechender Software – automatisch stattfinden kann. Als *Bildorientierung* bezeichnet man die mathematische Rekonstruktion der geometrischen Aufnahmesituation (Bestimmung der Kameraposen zum Zeitpunkt der Aufnahme), wobei regelmäßig simultan die Kalibrierung des Kamera-Objektiv-Systems erfolgt. Den zeitmäßig größten Aufwand beansprucht die photogrammetrische Auswertung. Hierbei werden die geometrischen und bildlich-semantischen Eigenschaften des zu untersuchenden Objektes anhand der Aufnahmen erfasst und dokumentiert. Das Grundprinzip der 3D-Objektpunktbestimmung beruht auf dem Triangulationsprinzip. Die Auswertung kann in Teilen automatisch, muss aber oftmals manuell stattfinden. Als Ergebnis erhält man dreidimensionale Informationen in Gestalt von Koordinaten einzelner Punkte, Kanten und Linien oder Orthophotos. Bildserien in zeitlichen Abständen ermöglichen die Dokumentation von dynamischen Prozessen.

Auf dem Prinzip der einfachen Bildauswertung basieren sogenannte Risskameras, wobei verschiedene Ausführungen am Markt existieren. Kameras mit einem mechanischen Rahmenvorsatz (z.B. Sachverständigen-Bedarf 2022) ermöglichen es, die Kamera in einem festen Abstand auf die Fläche aufzusetzen und zusammen mit einem Risslineal den Riss (oder Ausschnitte des Risses) zu fotografieren. Eine integrierte Beleuchtungseinheit für eine homogene Ausleuchtung und eine variable Vergrößerungsoptik (bis zu mehr als 30-fach) ermöglichen die sichere Bestimmung der Rissbreiten in den Bildern durch Risslinealvergleich mit Zehntelmillimeter-Genauigkeit.

(Luhmann 2018 S. 24, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 102)

Mehrwert

Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Aufnahmen aus großer Entfernung sind unproblematisch bzw. stellen sogar eine Stärke des Verfahrens dar
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit
- Für vom Boden nicht erreichbare Bereiche können die Bildaufnahmen auch von einem Hubsteiger, Gerüst o.ä. gemacht werden.

Zeitersparnis Inspektion



- Die Zeitersparnis ist in erster Linie bei den Arbeiten vor Ort gegeben. Den größten Zeitumfang beansprucht die Auswertung, wobei der Aufwand vom Dokumentationsziel und den Automatisierungsmöglichkeiten abhängt. Für die bildliche Auswertung in Form von Orthophotos sind ca. 4 Stunden (bis zu 50 Aufnahmen inkl. Rüstzeiten), für detaillierte 3D-CAD-Zeichnungen sind objektabhängig mehrere Tage bzw. Wochen anzusetzen.

Kosten



- Erfassungssensorik (Kamera mit Objektiven): ca. 2.000,- EUR (Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 2.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung

Datenqualität



- Die Aufnahmen dokumentieren neben den geometrischen gleichzeitig auch die *bildlich-semantischen* Objekteigenschaften.
- Die geometrische Genauigkeit hängt neben der Aufnahmeanordnung hauptsächlich vom *Bildmaßstab* der Aufnahmen ab und muss daher relativ auf die Objektdimensionen bezogen werden. *Relative Genauigkeiten* bis 1:100.000 und besser sind in Verbindung mit einer Signalisierung (d.h. Präparierung mit *Zielzeichen*) der Objektoberfläche möglich (z.B. für Verformungsmessungen).

(Luhmann 2018 S. 117, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 161, Blankenbach/Schwermann 2014)

Voraussetzungen

Hardware



- Kamera, idealerweise mit Wechselobjektiven
- Geodätisches Messinstrument (Tachymeter, Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)) für die Einmessung von Passpunkten
- Zielzeichen für die Signalisierung von Passpunkten und/oder der Objektoberfläche
- Kameras mit eingebauten GNSS (GNSS-Kameras) oder als Teilkomponenten eines Multi-Sensorsystems ermöglichen unter entsprechenden Bedingungen (z.B. GNSS-Empfang) eine direkte Georeferenzierung der Aufnahmen bei geringeren Genauigkeitsanforderungen und/oder die Bestimmung von Näherungswerten für die *Bildorientierung*
- Computer mit mittlerer Leistung (z.B. i5-Prozessor, 16 GB RAM Arbeitsspeicher)
- Photogrammetrische Auswertesoftware

Vorbereitung Untersuchungsobjekt



- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes selbst notwendig; für Verformungsmessungen ist die Präparierung mit (kodierten) Zielzeichen Bestandteil der Arbeiten vor Ort
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten

Vorbereitung Datenerhebung



- Definition der angestrebten 3D-Genauigkeit in der Auswertung; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Kameraposen (Standorte und Aufnahmerichtungen)
- Auswahl der Sensorauflösung (Pixelanzahl) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit
- Auswahl der Kamera-Objektiv-Kombination im Hinblick auf den erforderlichen (durchschnittlichen) *Bildmaßstab*
- Festlegung von Belichtungszeit und Blendeneinstellung vor dem Hintergrund der gegebenen Lichtverhältnisse und erforderlichen Tiefenschärfe
- Festlegung von Überdeckungsgrad (Überlappung benachbarter Bilder) und Anzahl der Aufnahmen im Hinblick auf die angestrebte Genauigkeit
- Ggf. Vorhalten eines Gerüsts, Hubsteigers o.ä. für höher gelegene Bereiche

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

Umweltbedingungen



- Normales Tageslicht stellt gewöhnlich ausreichende Lichtverhältnisse sicher mit Spielraum in den Kameraeinstellungen; ggf. muss künstliche Beleuchtung vorgehalten werden.
- Trockene Witterung nicht zwingend erforderlich

Erforderliche Genehmigungen



- Genehmigungen sind nicht erforderlich

Umsetzung

Datenerhebung



- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte
- Ggf. Präparierung der Objektoberfläche mit (kodierten) Zielzeichen (bei Verformungsmessungen)

- Erstellung der Aufnahmen gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung
- (Luhmann 2018 S. 260, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 114)

Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte
- Durchführung der *Bildorientierung* einschließlich Kamerakalibrierung
- Bildauswertung (Einzelbilder/Bildpaare/Bildverbände)
- Kartographische Nachbereitung der grafischen Auswerteergebnisse (ggf. zeichnerische Überarbeitung der Rohauswertung, Beschriftungen)
- Deformationsanalyse bei dynamischen Prozessen (Vergleich von Geometriezuständen zu unterschiedlichen Zeitpunkten)

(Luhmann 2018 S. 340, Wiggenhagen/Steensen 2021 S. 141, Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 370)

Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Photogrammetrie ist vorteilhaft mit dem (terrestrischen) Laserscanning kombinierbar, da beide Verfahren die Nachteile des jeweils anderen kompensieren; z.B. besitzt das Laserscanning nicht die Entfernungsabhängigkeit bei der Messgenauigkeit, wogegen die Messung von Ecken und Kanten in der Photogrammetrie unproblematisch ist.
- UAV-Photogrammetrie weist methodisch Ähnlichkeiten auf; durch die bewegliche Plattform liegen Aufnahmen aus der Luftperspektive vor, die das Anwendungsspektrum erweitern.

Output

Informationen



- Koordinaten von einzelnen Punkten
- Grafische (CAD-)Daten der geometrischen Objektstruktur
- 3D-Oberflächenmodelle
- RGB-Bildpläne (Orthophotos)
- *Bildlich-semantische* Helligkeits- und Farbinformationen

Dateiformate



- Aufnahmen in Standard-Rasterdatenformaten (i.d.R. JPG)
- Ergebniskoordinaten: ASCII
- Grafische Ergebnisdaten: DWG, DGN etc.
- Bildpläne/Orthophotos: RGB-Rasterdatenformate (JPG, TIF etc.)

- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

Referenzen

Beispielanbieter



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

Beispielanwendungen



- Modellierung Neue Schleuse Trier (Geodätisches Institut RWTH Aachen 2019)
- Bestimmung von Rissen auf Betonoberflächen durch bildbasierte Histogrammanalyse (Jutz/Özcan 2022)
- Kamerabasierte Rauigkeitsbestimmung an Betonoberflächen (Özcan/Schwermann/Blankenbach 2021)
- Deformationsvermessung von Haubenschildrohren (Blankenbach/Schwermann 2014)

Quellen



- Blankenbach J./Schwermann R.: Photogrammetrische Deformationsvermessung von Haubenschildrohren für den Rohrvortrieb. In Wieser(Hrsg.): Ingenieurvermessung 14 – Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, Wichmann Verlag (2014)
- Geodätisches Institut RWTH Aachen: Abschlussbericht zur Konzeption der Bestandsdatenerfassung und BIM-basierten Modellierung von Wasserbauwerken mit Evaluation am Demonstrator Neue Schleuse Trier (2019)
- Jutz L./Özcan B.: Automated Detection of Cracks based on Statistical Analysis of Image Histograms. 33. Bauinformatik Forum, München (2022)
- Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen – Methoden – Beispiele. Wichmann Verlag, Berlin Offenbach (2018)
- Özcan B./Schwermann R./Blankenbach J.: Ein Messsystem zur kamerabasierten Bestimmung der Rauigkeit von Bauteiloberflächen – Konzept und Evaluierung. avn, Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 01 (2021).
- Sachverständigen-Bedarf (2022): Homepage, <https://sachverstaendigen-bedarf.de/Rissdokumentation/Risskamera.html>, zuletzt besucht September 2022
- 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.
Relative 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 Vorwärtsein-

schneiden 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 (z.B. Passpunkte) 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.