Handscanner und Laserlinienscanner (Triangulationsscanner)

Definition

Handgeführte Scanner mit Kamera und aktiver Lichtquelle arbeiten nach dem Triangulationsverfahren, einer speziellen Anwendung der Photogrammetrie. Das von einem Linienlaser (→ Laserlinienscanner) oder Streifenlichtprojektor (→ Streifenlichtscanner) projizierte Licht wird mit einer Kamera aufgenommen. Die Lichtquelle ist relativ zur Kamera fixiert und exakt kalibriert. Aus der Lage der abgebildeten Linien im Kamerabild können in Verbindung mit der bekannten Lage der Lichtebenen relativ zur Kamera 3D-Profile berechnet werden. Für jeden einzelnen Punkt wird im Prinzip eine Dreiecksberechnung (Triangulation) durchgeführt, durch die sich auch die begrenzte Reichweite erklärt. Mit zunehmendem Abstand werden die Dreiecke sehr spitz und die Unsicherheit nimmt mit zunehmender Entfernung überproportional zu.

Unterschieden wird zwischen Laserlinienscannern, bei denen nur eine oder wenige Lichtebenen aktiv sind und Streifenlichtscannern, die mit einem Projektor viele parallele Linien erzeugen.

(Bleier, van der Lucht, Nüchter 2021)

Anwendungsfall

Anwendungsbereich

- Triangulationsscanner werden üblicherweise in der Qualitätssicherung in der industriellen Messtechnik (z.B. Formprüfung) eingesetzt
- In der Bauwerksinspektion sind sie vielfach einsetzbar für beliebige Oberflächen und kleine komplexe Objekte oder lokal begrenzte Bereiche mit einer Ausdehnung von wenigen Metern
- Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von lokalen Verformungen
- Vermessung und Monitoring von Details und kleinen Objekten im Nahbereich von weniger als 1 m Entfernung (z.B. Deformationen und Schäden im Stahl-und Massivbau)
- Generierung von einzelnen Messprofilen und 3D-Oberflächen- oder Volumenmodellen (abhängig von der Art der Lichtquelle evtl. auch texturiert)
- Schadensdetektion von Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen, freiliegender Bewehrung, Rissen > 1mm
- Die meisten Geräte sind ausschließlich für den Einsatz über Wasser vorgesehen. Es gibt aber auch spezielle Instrumente für den Einsatz unter Wasser

Rahmenbedingungen

- Gute Sichtbarkeit und Zugänglichkeit der Oberflächen aus verschiedenen Richtungen
- Matte, diffus reflektierende Oberflächen. Stark spiegelnde Oberflächen sind nicht messbar.
- Umgebungsbeleuchtung muss im Vergleich zur Lichtstärke des Projektors gering sein, keine direkte Sonneneinstrahlung.

- Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer besonders detaillierten Erfassung lokaler Bereiche mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.
- Bei starken Laserlinienprojektoren sind gegebenenfalls die Sicherheitsvorschriften der entsprechenden Laserschutzklasse nach DIN EN 60825-1 zu berücksichtigen

Technischer Hintergrund

Erläuterung der Funktionsweise

Bei Laserlinienscannern wird ein Lichtstrahl mit einer Zylinderlinse zu einer Lichtebene aufgeweitet. Ein Streifenlichtscanner erzeugt mit einem lichtstarken Projektor viele Lichtebenen, die durch eine Codierung unterschieden werden. Die Codierung wird durch Bitmuster, mehrere aufeinanderfolgende Hell-Dunkel-Phasen, realisiert. Jede Lichtebene hat ein festes individuelles Muster, das sich für jedes Pixel in den aufgenommenen Bildsequenzen eindeutig zuordnen lässt.
Die Messgenauigkeit und der Messbereich werden im Wesentlichen durch den Winkel und Abstand zwischen Lichtebene und Kamera bestimmt. Je kleiner der Messbereich, umso höher ist in der Regel die Messgenauigkeit. Das Verfahren wurde ursprünglich vorwiegend im industriellen Bereich mit stationären Scannern eingesetzt, wo Genauigkeiten bis in den µm-Bereich möglich sind, aber auch mit frei geführten Handscannern können Genauigkeiten im Submillimeterbereich erzielt werden.
Mit speziellen abgedichteten Geräten ist auch der Einsatz unter Wasser möglich. Der Messbereich wird dann zusätzlich durch die Wassertrübung und Absorption des Lichts begrenzt.
Für die Vermessung von Oberflächen wird das Messsystem kontinuierlich entlang der Oberfläche geführt und die Einzelmessungen zu 3D-Punktwolken oder Oberflächen zusammengesetzt. Dazu muss ständig die genaue Position der Kamera relativ zu den bisherigen Aufnahmen bestimmt werden. Bei frei geführten Handscannern für den Außeneinsatz erfolgt die Bestimmung der aktuellen Lage (Position und Rotation) kontinuierlich und relativ zur vorherigen Position. Es gibt geometriebasierte Verfahren bei denen überlappende 3D-Punktwolken verwendet werden (*ICP*, Iterative Closest Point) und bildbasierte Verfahren, bei denen überlappende Bildbereiche für die Lageänderung herangezogen werden (*SfM*, Struture from Motion).
Die maximale Messfrequenz hängt von der Empfindlichkeit der Kamera, der Lichtstärke des Projektors, der Kameraauflösung und der Bandbreite der Datenübertragung ab und kann zwischen 1 Hz und mehr als 100 Hz liegen.
Aufgrund der geringen Baugröße von Handscannern beträgt der Aufnahmeabstand nur wenige Dezimeter. Die maximale Reichweite von Laserlinienscannern für den Einsatz unter Wasser hängt auch von der Wellenlänge bzw. Farbe des Lichts ab. Rotes Licht (Wellenlänge >700 nm) wird stärker absorbiert als grünes (500-600 nm) oder blaues Licht (< 500 nm).

(Sardemann et al. 2022, Castillón et al. 2019)

Mehrwert

Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit

- Für den Einsatz von Handscannern gibt es aufgrund des geringen Gewichts (teilweise < 1 kg) kaum Einschränkungen. Das Messobjekt muss aufgrund der sehr begrenzten Reichweite aber direkt zugänglich sein. Der maximale Arbeitsbereich kann durch die Datenübertragung zum PC beschränkt sein (Kabel oder drahtlos)
- Für den Einsatz von Laserlinienscanner unter Wasser gilt: Im Vergleich zu Tauchgängen ist die Arbeitssicherheit deutlich höher. Das Bedienpersonal bleibt über Wasser und das Laserliniensystem wird von der Wasseroberfläche aus gesteuert. Die üblichen Sicherheitsvorschriften bei Arbeiten am Wasser sind weiterhin zu beachten.
- Bei Systemen mit Laserlichtquellen muss die Laserschutzklasse berücksichtigt werden. Häufig werden Systeme mit Laserschutzklasse 2 (eingeschränkt augensicher) eingesetzt.

Zeitersparnis Inspektion

- Eine Zeitersparnis ist erheblich, weil die Ergebnisse unmittelbar nach der Aufnahme der Profile in digitaler Form vorliegen und keine händische Kartierung erforderlich ist. Die Aufnahmezeit pro Objekt oder Schadstelle beträgt wenige Sekunden oder Minuten.

Kosten

- Die Kosten für Komplettsysteme mit Handscanner, PC und Software oder Laserlinienprojektor, Kamera und weiteren Sensoren für die Positionierung hängen von vielen Faktoren ab, unter anderem Messgenauigkeit, Reichweite und Messfrequenz (> 10.000 EUR).
- Die Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung von kleineren Einzelbereichen sind aufgrund der geringen Messzeit pro Objekt eher gering und gut kalkulierbar.
- Für die Vermessung größerer Teile von Bauwerken (z.B. gesamte Schleusenwand) kann der Aufwand schnell unwirtschaftlich werden.

Datenqualität

- Die geometrische Genauigkeit der Einzelprofile hängt von der Entfernung zwischen der Kamera und der Oberfläche ab. Aufgrund des Triangulationsverfahrens steigt die Unsicherheit der Messung überproportional an, wenn der Winkel zwischen Laserebene und Bildstrahl klein ist. Bei einem typischen Abstand von wenigen dm zwischen Kamera und Laserebene liegt die Messgenauigkeit im Submillimeterbereich.
- Die Genauigkeit der gemessenen absoluten Position und Rotation des gesamten Laserliniensystems bestimmt die Genauigkeit des resultierenden Oberflächenmodells. Die Qualität hängt aufgrund des *ICP-*

Verfahrens nicht nur von der Dimension des Objektes, sondern auch von der Form und Beschaffenheit der Oberfläche und der Überlappung zwischen den Einzelaufnahmen ab. Ungünstig sind z.B. tiefschwarze oder spiegelnde Oberflächen oder Hohlräume mit Überhängen.
- Zusätzlich zur Geometrie der Oberfläche können einige Scansysteme auch die Bildinformationen auf die Oberfläche zurück projizieren, so dass schließlich ein photorealistisches Modell mit hochauflösender Textur entsteht.

Voraussetzungen

Hardware

- Sensoreinheit mit LED- oder Laserprojektor und Einzel- oder Stereokamera
- Eventuell zusätzliche Sensoren zur Bestimmung der Position der Sensoreinheit
- Computer zur Aufzeichnung und Auswertung der Kameradaten und weiterer Sensordaten oder evtl. Echtzeitauswertung

Vorbereitung Untersuchungsobjekt

- Bei spiegelnden Oberflächen: Präparierung der Oberfläche mit mattem Sprühlack
- Gegebenenfalls Befreiung der Oberflächen von Algen oder anderem Bewuchs
- Gegebenenfalls Reduzierung von Umgebungslicht (Abschattung)
- Bei Aufnahmen unter Wasser: Möglichst lange Zeit vor der Messung keine Aufwirbelung von Sediment, um gute Sicht zu gewährleisten

Vorbereitung Datenerhebung

- Falls das Kamerasystem nicht bereits vom Hersteller kalibriert und fixiert ist, gegebenenfalls Kalibrierungsmessung zur Bestimmung der relativen Position der Kamera zur Laserebene
- Für mechanischen bewegte Laserlinienscannern: Definition der Belichtungszeit, Messfrequenz, Bewegungsgeschwindigkeit anhängig von Messentfernung, Lichtstärke, Messdichte usw.

  (Hildebrandt et al. 2008)

Umweltbedingungen

- Kein direktes Sonnenlicht bei Datenerhebung
- Vorgaben des Herstellers bezüglich Temperaturbereich beachten
- Für Aufnahmen unter Wasser: Geringe Wassertrübung

Erforderliche Genehmigungen

- Keine Genehmigungen erforderlich (Ausnahmen in sicherheitsrelevanten Einrichtungen)

Umsetzung

Datenerhebung

- Durchführung von Testaufnahmen zur Beurteilung der maximalen Reichweite, Lichtstärke, Erkennbarkeit der Laserlinie, und maximalen Messgeschwindigkeit
- Durchführung der Profilmessungen und Aufzeichnung der Messdaten gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

Datenprozessierung

- Die Berechnung der 3D-Punktwolke wird direkt in der Steuersoftware für das Messsystem vollautomatisch durchgeführt und besteht intern grob aus folgenden Schritten
    - Detektion der Line(n) in den Einzelbildern
    - Berechnung der Tiefenwerte bezogen auf das Kamerasystem
    - Berechnung der absoluten Position und Rotation des Systems zu jedem Zeitpunkt
    - Transformation der Einzelprofile in den 3D-Raum
- Filterung der Gesamtpunktwolke, Entfernung von Fehlmessungen
- Bei großen Objekten: evtl. Zusammenführen von getrennt gemessenen Teilbereichen zu einer Gesamtpunktwolke
- Erzeugung eines Oberflächenmodells (Dreiecksflächennetz)
- Datenanalyse, Detektion von Schadstellen, Vergleich mit vorherigen Messungen

Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden

- Die Messungen mit Triangulationsscannern basieren zwar auf einem völlig unterschiedlichen Messverfahren gegenüber terrestrischen Laserscannern (TLS) (siehe Steckbrief TLS), erzeugen aber ähnliche Ergebnisse. Unterschiedlich sind die Reichweite, Auflösung und Punktdichte.
- Überschneidungen gibt es auch mit ROV, weil es Trägerplattform für ein Laserlinienmesssystem sein kann.

Output

Informationen

- 3D-Punktwolken
- Oberflächenmodelle
- Digitale Höhen- und Oberflächenmodelle
- Profilschnitte
- Orthophotos, Schadenskartierungen

Dateiformate

- Bei Messungen mit geringer Messfrequenz und geringen Datenmengen können Textdateien mit einfachen Listen 3D-Koordinaten ausreichend sein.
- 3D-Punktwolken: LAS, PTX, E57, XYZRGB
- Oberflächenmodelle: STL, OBJ, PLY, WRL
- CAD-Formate, Volumenmodelle: STEP, IGES
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

Referenzen

Beispielanbieter

Handscanner:

- CREAFORM https://www.creaform3d.com/de
- SCANTECH https://www.3d-scantech.com/de/
- Artec3D https://www.artec3d.com/de
- SHINING 3D https://shining3d.com/de/

Laserlinienscanner für Einsätze unter Wasser:

- VOYIS Imaging Inc. (vor 2021: 2G Robotics), Ontario, Kanada https://voyis.com/
- Savante Offshore Services Ltd, Großbritannien https://www.savante.co.uk/

Beispielanwendungen

- Nicht bekannt

Quellen

- M. Bleier, J. van der Lucht, A. Nüchter: SCOUT3D – ein Unterwasser-Laserscanner für mobile Kartierung. avn, Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 4 (2021)
- M. Castillón, A. Palomer, J. Forest, P. Ridao: State of the Art of Underwater Active Optical 3D Scanners. Sensors Heft 19 (2019)
- Sardemann, H., Mulsow, C. & Maas, HG. Accuracy Analysis of an Oblique Underwater Laser Lightsheet Triangulation System. PFG 90, 3–18 (2022). https://doi.org/10.1007/s41064-022-00196-x
- M. Hildebrandt, J. Kerdels, J. Albiez and F. Kirchner, "A practical underwater 3D-Laserscanner," OCEANS 2008, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151964.

Glossar:

ICP-Algorithmus:	Der ICP-Algorithmus (englisch Iterative Closest Point) ist ein Verfahren um Punktwolken optimal aufeinander einzupassen. Bei der Durchführung des Algorithmus wird versucht, die überlappenden Punktwolken mittels Rotation und Translation möglichst gut miteinander in Deckung zu bringen.
Structure from Motion:	Structure from Motion (SfM) ist ein Verfahren aus der Robotik, mit dem aus der Verschiebung von markanten Objekten in Kamerabildern die Verschiebung und Drehung des Bildsensors und gleichzeitig die 3D-Koordinaten der Merkmalspunkte bestimmt werden.