
Multi-Sensorsystem für hochpräzise, georeferenzierte visuelle Punktbestimmung¹

DI Stefan SCHAUFLER², Dr. Xiaoguang LUO³ und DI Bernhard RICHTER⁴

²Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz · stefan.schaufler@leica-geosystems.com

³Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz

⁴Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz

Zusammenfassung

Die Verfügbarkeit von leistungsstarken, mobilen Prozessoren eröffnete bahnbrechende Fortschritte in der Bildverarbeitung (Computer-Vision-Algorithmen) und leitete somit ein Revival der Photogrammetrie ein. Gebündelt mit Multi-Sensorsystemen (z. B. GNSS, IMU, Odometer, Kompass) entstanden neue Möglichkeiten für Positionierungs- und Realitätserfassungssysteme. Diese Anwendungen beruhen auf einer genauen und robusten Bestimmung der sechs Freiheitsgrade (6DoF – X, Y, Z und Roll-Nick-Gier-Winkel), wobei in erster Linie das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) und das Trägheitsnavigationssystem (INS) kombiniert werden. Das Einbeziehen von GNSS hat den Vorteil, dass die Position direkt in einem globalen Referenzsystem geschätzt werden kann. Zusätzliche Messsysteme, wie kamerabasierte Systeme (Visuelle Inertialsysteme – VIS), LiDAR und Scanning, profitieren ebenfalls von der präzisen Lage und den georeferenzierten Positionsinformationen.

In dieser Arbeit wird das Potenzial und die Einsatzmöglichkeit eines Vermessungssystems, das die in Echtzeit gewonnenen 6DoF-Informationen mit simultaner Bildfassung kombiniert, analysiert. Dabei werden Positions- und Lageschätzungen mittels eines GNSS/INS-Systems mit zeitgleichen Bildaufnahmen einer Kamera und Computer-Vision-Algorithmen verknüpft. Die Kombination von terrestrischer Photogrammetrie mit GNSS-RTK ermöglicht nun entfernte, unerreichbare Punkte direkt, beinahe in Echtzeit zu erfassen. Dadurch werden global georeferenzierte Messungen mit Zentimetergenauigkeit auch von Positionen möglich, an denen kein GNSS-Signal verfügbar ist oder die Sicherheit der Vermesser gefährdet würde, wie zum Beispiel auf stark befahrenen Straßen. Hochpräzise, photogrammetrische Vermessungen und Szenendokumentationen können bequem in einem globalen Referenzsystem unmittelbar im Feld durchgeführt werden. Dies führt folglich zu erhöhter Produktivität und Anwenderfreundlichkeit. Eine sogenannte Snapping-Funktion selektiert Kanten in der Nähe des Cursors selbständig in einem einzigen Bild und ein automatisierter Algorithmus berechnet die Koordinaten samt Genauigkeitsschätzung.

Um die Leistung des Multi-Sensorsystems zu verifizieren, sind repräsentative Tests durchgeführt worden. Dabei wurden unterschiedliche Objektpunkte in Bildern gemessen, die von verschiedenen Kamera-zu-Objekt Abständen und mit variablen Eigenschaften der Trajektorien aufgenommen worden sind. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser neuartigen Sensorfusionsplattform bewerten zu können, werden die Ergebnisse mit einem Referenzfeld mit höherer Genauigkeit verglichen. Dabei lässt sich erkennen, dass die Kombination von

¹ Dieser Artikel baut auf der Publikation SCHAUFLER et al. (2020) in den FIG Proceedings 2020 auf.

terrestrischer Photogrammetrie mit einem GNSS/INS-System enormes Potenzial für Vermessungsanwendungen bietet, bei denen hochpräzise, georeferenzierte Daten innerhalb kürzester Zeit benötigt werden.

1 Einleitung

In der klassischen GNSS-RTK-Vermessung wird die Rover-Position im Antennenphasenzentrum bestimmt, während die Spitze des Lotstabes auf dem Messpunkt positioniert wird. Bei herkömmlichen RTK-Vermessungsverfahren muss der Lotstab senkrecht gehalten werden, um die Position des Phasenzentrums an die Position der Lotstockspitze zu reduzieren. Technische Innovationen der letzten Jahre ermöglichen nun auch bei geneigtem Lotstock eine präzise Positionsbestimmung der Lotstockspitze. Moderne GNSS-Smartantennen wie der Leica GS18 T ermöglichen dank der ausgeklügelten Kombination von GNSS und INS (Trägheitsnavigationssystem) RTK-Messungen mit kalibrierfreier Neigungskompensation. Das INS berechnet den Neigungswinkel zur vertikalen Achse und die Richtung des geneigten Lotstabes (in Bezug auf geographisch Nord) in Echtzeit, um eine anschließende Kompensation des Verkippungsfehlers zu ermöglichen. Innovationen dieser Art beschleunigen den Vermessungsablauf, indem sie schnellere Messungen und eine größere Verfügbarkeit in schwierigen Umgebungen gewährleisten. Punkte wie Gebäudeecken, die bisher mit einem senkrechten Lotstock nicht präzise erfasst werden konnten, können nun im Neigungskompensationsmodus zentimetergenau gemessen werden (DUSHA 2017, LUO et al. 2018b, LUO et al. 2018c). Trotz der Vorteile durch die Neigungskompensation unterliegt die Verwendung eines am Lotstock montierten GNSS-Empfängers jedoch gewissen Einschränkungen:

- **Physischer Zugang erforderlich** – Die Lotstockspitze muss auf den Messpunkt platziert werden, was in gefährlichen Messbereichen (z. B. Straße mit hohem Verkehrsaufkommen) die Sicherheit beeinträchtigt. Ebenso sind bestimmte Bereiche unter Umständen nur eingeschränkt zugänglich oder können nicht direkt mit der Lotstockspitze erreicht werden (z. B. Punkte auf einem Dach oder in einer tiefen Baugrube);
- **Zeitaufwendig** – Die Anbringung der Lotstockspitze auf den Zielpunkt erfordert Zeit, sodass die Messung einer großen Anzahl an Punkten sehr viel Zeit in Anspruch nehmen kann;
- **Störung des GNSS-Signals** – Das Grundproblem bei GNSS-Vermessung liegt an den sehr schwachen Signalen, die leicht abgeschattet und blockiert werden können. Ein Gebäude oder Baum kann die Satellitensignale schon so weit stören, dass eine direkte, hochpräzise GNSS-RTK-Messung nicht mehr durchgeführt werden kann.

Es besteht Entwicklungsbedarf für ein Vermessungskonzept, das diese Hindernisse überwindet, indem es präzise Punktmessung aus der Distanz ermöglicht. Des Weiteren sollte das Vermessungssystem eine mit GNSS-RTK vergleichbare Positionierungsqualität liefern und gleichzeitig die Verfügbarkeit steigern und die Arbeitsabläufe verbessern.

In den letzten Jahren haben Fortschritte im Bereich Computer Vision neue Möglichkeiten für Positionierungs- und Reality-Capture-Systeme eröffnet. Kamerabasierte visuelle Inertialsysteme (VIS) bedürfen einer präzisen Bestimmung der Kamerapose (Position und Orientierung); daher profitieren sie von der Einbindung in ein GNSS/INS-System. Darüber hinaus

besteht ein Hauptvorteil durch die Inkludierung von GNSS darin, dass die VIS-basierte Positionsbestimmung direkt in einem globalen Referenzsystem erfolgen kann. Durch die Kombination von Kameramodul und GNSS-Rover können georeferenzierte Punkte mithilfe der Photogrammetrie nahezu in Echtzeit aus der Ferne hochgenau gemessen werden (SIERCKS et al. 2019). Diese Technologie unter Verwendung der terrestrischen Photogrammetrie kann eine potenziell höhere Effizienz sowie Vereinfachungen der Vermessungsabläufe erzielen.

Dieser Beitrag stellt ein neues, bildbasiertes Vermessungsverfahren vor, bei dem ein Multi-Sensorsystem bestehend aus GNSS, inertialen Messeinheiten (IMU) und einem Kameramodul zum Einsatz kommt. Bildaufnahmen zusammen mit präzisen georeferenzierten Kamerapositionen eröffnen Vermessungsanwendungen vielfältige Möglichkeiten, die die folgenden Vorteile mit sich bringen:

- Produktivitätssteigerung – Erfassung einer großen Anzahl an Punkten innerhalb kürzester Zeit;
- Höhere Verfügbarkeit – Messung von Punkten an Standorten mit gestörtem GNSS-Signalempfang, an denen alternative Lösungen (z. B. eine Totalstation) zeit- und kostenintensiv wären;
- Höhere Sicherheit – Messung von Punkten, die für den Vermesser nicht gefahrlos zugänglich sind (z. B. mitten auf einer dicht befahrenen Straße, in einer tiefen Baugrube);
- Größere Flexibilität – Schnellstmögliche Erfassung der Szene; die Entscheidung, was gemessen werden soll, kann später getroffen werden.

2 Georeferenzierte visuelle Punktbestimmung

Das hier vorgestellte Messverfahren zur georeferenzierten visuellen Punktbestimmung kombiniert die präzisen Positions- und Lageinformationen des GNSS-Rovers mit Bildaufnahmen vom Kameramodul. In Abbildung 1 ist der Messablauf schematisch dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, bewegt sich der Sensor entlang einer Trajektorie, nimmt zur Epoche t_i ein Bild vom Objekt auf und schätzt gleichzeitig die Sensorposition und -lage für dieselbe Epoche in Echtzeit. Wenn das Objekt aus unterschiedlichen Perspektiven und zu verschiedenen Epochen ($t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots$) erfasst wird, kann die Position dieses Objektes direkt nach der Bildaufnahme photogrammetrisch bestimmt werden. Dieses bildbasierte Messverfahren ermöglicht eine hochpräzise, georeferenzierte Punktbestimmung nahezu in Echtzeit – ohne zusätzliche Nachbearbeitungsschritte oder Nutzung von Bodenkontrollpunkten. Dieses neuartige Messkonzept wird erstmals mit der Leica GS18 I Smartantenne realisiert, wobei die Feldsoftware Leica Captivate den Nutzern bei der Bildgruppenaufnahme und Messungen aus den Bildern unterstützt.

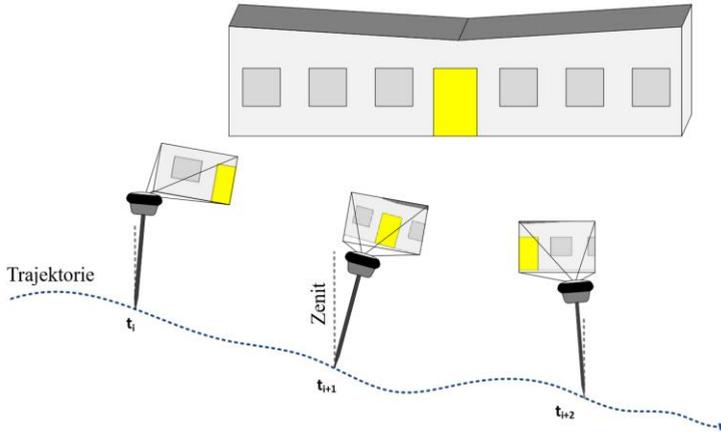


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messablaufs des bildbasierten Messverfahrens.

2.1 Global referenzierte Kameraposen

Der bildbasierte Vermessungsansatz des GS18 I stützt sich auf eine hochgenaue und zuverlässige Bestimmung der Kamerapose an den jeweiligen Zeitpunkten der Bildaufnahmen. Die Kamerapose ist die Kombination von Position und Orientierung einer Kamera im dreidimensionalen Raum. Die Schätzung der finalen Kamerapose erfolgt in zwei Schritten und wird in Abbildung 2 visualisiert.

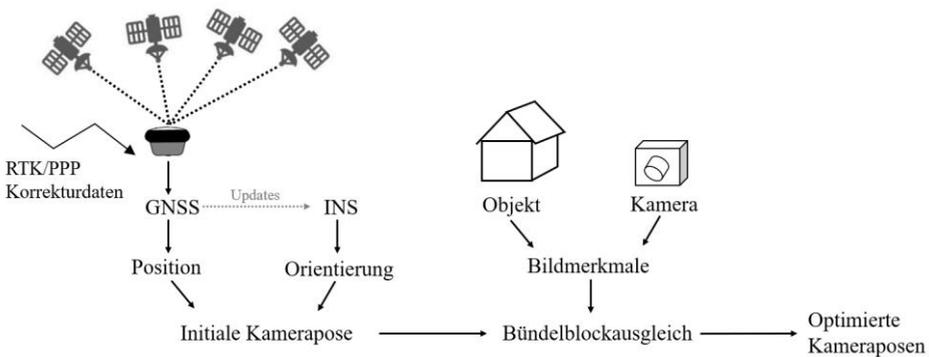


Abb. 2: Flussdiagramm zur Bestimmung global referenzierter Kameraposen.

Um global referenzierte Kameraposen zu erhalten, wird zunächst die initiale Kamerapose mithilfe des IMU-basierten GNSS/INS-Kopplungssystems ermittelt. Die Kombination von GNSS und IMU stellt eine etablierte Sensorfusionstechnik zur Schätzung der 6DoF dar (JEKELI 2001, TITTERTON & WESTON 2004, GROVES, 2013). Die GNSS/IMU-Integration macht sich die komplementären Eigenschaften der beiden Navigationssensoren zunutze. Solche kombinierten Navigationssysteme sind seit vielen Jahren in der Luft- und

Raumfahrtindustrie vorhanden und stehen nun auch für Vermessungsanwendungen, wie zum Beispiel GNSS-RTK mit Neigungskompensation, zur Verfügung. Die verwendeten RTK-Korrekturdaten definieren den zugrundeliegenden Referenzrahmen. Dies hat den Vorteil, dass anschließend keine Koordinatentransformation der photogrammetrischen Messungen vom lokalen in das globale System (z. B. unter Verwendung von Bodenkontrollpunkten) erforderlich ist. Zur Steigerung der Verfügbarkeit und Genauigkeit der hochpräzisen RTK-Positionierung empfiehlt sich die zusätzliche Nutzung von Galileo, insbesondere unter schwierigen Messbedingungen, beispielsweise in der Nähe eines Gebäudes (LUO et al. 2018a, LUO et al. 2020). Die GNSS/IMU-Integration liefert die initiale georeferenzierte Position und Orientierung des Kameramoduls.

Zusätzlich extrahiert der Sensor während der Bilderfassung mittels Interest-Operatoren Merkmale aus den Bildern (Abbildung 3). Bei einem Merkmal handelt es sich um markante Bildpunkte (sogenannte Features), wie zum Beispiel lokale Extrema (Maxima oder Minima), die ebenfalls in anderen Bildern detektiert werden können, um eine Verknüpfung zwischen Bildern zu ermöglichen (LUHMANN et al. 2014). Die Features werden zur Herstellung einer geometrischen Verbindung zwischen den Bildern generiert. Anschließend nach der Datenaufnahme, wird die Geometrie zwischen den einzelnen Kameraposen und den aus den Features errechneten 3D-Objektpunkten mithilfe einer Bündelblockausgleichung iterativ optimiert. Das Ergebnis der Bündelblockausgleichung sind ausgeglichene Kamerapositionen und Orientierungen zu den Zeitpunkten der Bildaufnahmen.

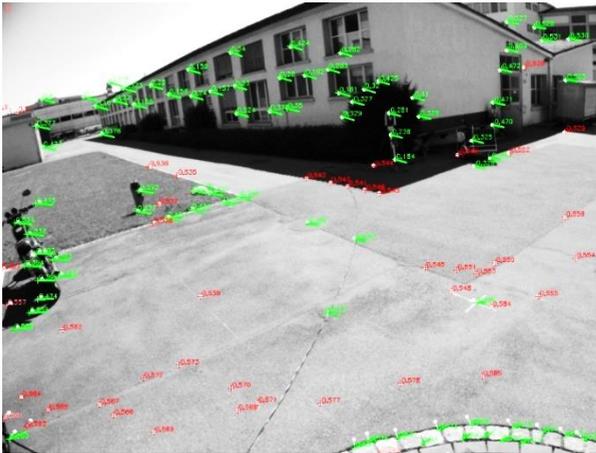


Abb. 3: Beispiele von automatisch generierten Features (rot: Features, die nicht in anderen Bildern wiedergefunden werden können und somit nicht für die Bündelblockausgleichung verwendet werden).

2.2 Visuelle Punktbestimmung

Nach KRAUS (2007) lässt sich die Position, Lage, Form und Größe eines Objektes aus Bilddaten rekonstruieren. Die Koordinaten der auf den Bildern erfassten Objektpunkte können mithilfe photogrammetrischer Verfahren und ohne physischen Kontakt ermittelt werden.

Dies ermöglicht die Fernmessung von Punkten lediglich anhand der Bildinformationen, ein Verfahren, das im Bereich der Photogrammetrie bereits seit Jahrzehnten Verwendung findet.

Um Objektpunktmessung mittels photogrammetrischen Vorwärtsschnittes durchführen zu können, sind Bildaufnahmen und die zugehörigen Kameraposen erforderlich. Wenn ein Objektpunkt in mindestens zwei Bildern erfasst wird, können die 3D-Koordinaten des Objektpunktes unter Verwendung des Vorwärtsschnittes berechnet werden (KRAUS 2007). Abbildung 4 stellt beispielsweise die Messung zweier Objektpunkte P_{10} und P_{20} schematisch dar. Diese Punkte werden von drei unterschiedlichen Bildern (KF0, KF1 und KF2) erfasst und die korrespondierenden Kameraposen (O_0 , O_1 und O_2) sind bekannt. Die 3D-Koordinaten von P_{10} und P_{20} werden durch den räumlichen Vorwärtsschnitt ermittelt, indem die entsprechenden Bildkoordinaten der Objektpunkte in KF0, KF1 und KF2 ausgewählt werden. Da der GS18 I die Kamerapose direkt in einem von GNSS vorgegebenen, globalen Referenzrahmen schätzt, werden die resultierenden Objektkoordinaten automatisch im gleichen Koordinatensystem georeferenziert.

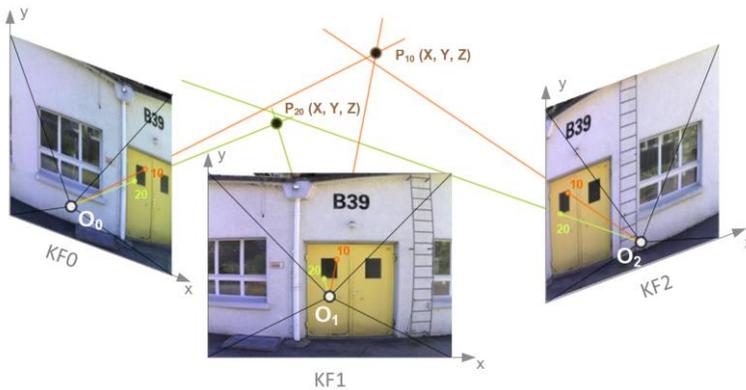


Abb. 4: Schematische Darstellung des photogrammetrischen Vorwärtsschnittes zur Messung der Objektpunkte P_{10} und P_{20} (MAJERIC 2020).

2.3 Automatische Punktzuordnung

Die Zuordnung der Bildkoordinaten eines Objektpunktes aus mehreren Bildern ist ein wesentlicher Bestandteil der visuellen Punktbestimmung. Um die Nutzer zu unterstützen, wurde in Leica Captivate ein Algorithmus zur automatischen Punktzuordnung (engl.: point matching) implementiert. Dies ist in Abbildung 5 anhand eines Eckpunktes veranschaulicht. Nachdem der Anwender den Objektpunkt manuell in einem einzigen Bild ausgewählt hat, in dem dieser am deutlichsten erkennbar ist, extrahiert der Matching-Algorithmus einen Referenzbildbereich im Umkreis des selektierten Bildpunktes. Bei diesem Bildausschnitt handelt es sich um einen Teilbereich des Bildes, der das Umfeld des gewählten Bildpunktes beschreibt. In der Epipolargeometrie stellt die Epipolarlinie die Schnittstelle eines Bildes mit der Epipolarebene dar und verbindet die jeweiligen Punkte in unterschiedlichen Bildern (HARTLEY & ZISSERMAN 2003). Der Matching-Algorithmus sucht nun in unterschiedlichen Bildern entlang der Epipolarlinie nach ähnlichen Strukturen wie der des Referenzbild-

ausschnittes und extrahiert die Bildkoordinaten desselben Objektpunktes automatisch aus unterschiedlichen Bildern. Unterberücksichtigung des Effizienz- und Genauigkeitsaspekts wird in der aktuellen Implementierung ein ausgewählter Bildpunkt in bis zu fünf Bildern automatisch zugeordnet, in denen das Objekt sichtbar und auffindbar ist. Dabei gewährt eine minimale Parallaxe zwischen benachbarten Bildern einen guten Schnittwinkel für die anschließende visuelle Punktbestimmung. Dieses Verfahren ermöglicht eine hochpräzise Messung der Objektpunkte durch einen einzigen Klick im Bild und steigert dadurch die Benutzerfreundlichkeit und die Produktivität.



Abb. 5: Automatische Punktzuordnung durch die Suche nach einem Referenzbildausschnitt entlang der Epipolarlinie in mehreren Bildern.

3 Analyse der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit des Multi-Sensorsystems zur visuellen Punktbestimmung wird hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der einzelnen Punktmessungen sowie der Distanzmessung zwischen zwei Punkten analysiert. Hierzu wurden insgesamt 149 Bildgruppen mit dem Leica GS18 I aufgenommen, wobei eine Bildgruppe eine Kollektion von Bildern und Kameraposen derselben Szene umfasst. Die repräsentative Datengrundlage besteht aus Bildaufnahmen mit unterschiedlichen Trajektorien, die sich im Hinblick auf Geometrie, dynamische Verhalten und Umweltbedingungen unterscheiden. Die erfassten Bildergruppen beinhalten realistische Einsatzszenarien unter Berücksichtigung verschiedener Kamera-Objekt-Entfernungen (2–10 m), schwieriger GNSS-Messbedingungen (z. B. aufgrund der Mehrwegeeffekte) und unterschiedlicher Lichtverhältnisse. Anschließend wurden in diesen 149 Bildgruppen 1.075 Objektpunkte mittels visueller Positionierung mit Leica Captivate Version 5.50 gemessen. Abbildung 6 zeigt einige Beispiele von ausgewählten Testpunkten. Die gemessenen Testpunktkoordinaten wurden mit Referenzkoordinaten verglichen, die mit einer höheren Genauigkeit mittels Totalstation unabhängig ermittelt wurden.

**Abb. 6:**

Beispiele von ausgewählten Testpunkten (Randsteine, Fensterecken, Betonkanten und Leitungen) zur Analyse der Leistungsfähigkeit der visuellen Punktbestimmung.

3.1 Globale Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Der Leica GS18 I liefert 3D-Positionen der Objektpunkte im globalen Koordinatensystem, das von GNSS-RTK beziehungsweise PPP (engl.: precise point positioning) definiert wird. Der Begriff „globale Genauigkeit“ umfasst alle Messfehler und Unsicherheiten bei der GNSS-Positionierung während der Datenaufnahme sowie die Fehlereinflüsse des photogrammetrischen Vorwärtsschnittes. Er stellt die zu erwartende Gesamtgenauigkeit der visuellen Punktbestimmung dar. Basierend auf den 1.075 visuellen Punktmessungen ist der 3D-Fehler in 80 % der Fälle kleiner als 5 cm, wobei 50 % der 3D-Abweichungen zwischen 2,2 cm und 4,6 cm liegen (SCHAUFLER et al. 2020). In Tabelle 1 sind die Fehlerstatistiken der Testmessungen mittels visueller Punktbestimmung zusammengestellt. Die 2D- und 1D-RMS-Fehler betragen jeweils 2,9 cm beziehungsweise 2,5 cm, wobei die 3D-Genauigkeit sich auf 4,0 cm beläuft. Dieser Genauigkeitsgrad ist ausreichend für viele präzise Vermessungsaufgaben, wie zum Beispiel Gebäudeaufnahme, topographische Vermessung und Einmessung von Rohren und Kabeln im Bau und Versorgungsbereich.

Tabelle 1: Fehlerstatistiken der 1.075 Testmessungen mittels visueller Punktbestimmung (RMS: root mean square).

	Gesamt (3D) [m]	Lage (2D) [m]	Höhe (1D) [m]
Mittelwert	0,036	0,025	0,020
Standardabweichung	0,018	0,015	0,014
RMS-Fehler	0,040	0,029	0,025

Neben den Koordinaten des Objektpunktes liefert der Algorithmus auch eine Qualitätsschätzung der Koordinaten. Die Koordinatenqualität (KQ) gibt die Unsicherheit des bestimmten Messpunktes an. Der KQ-Wert wird so berechnet, dass eine Wahrscheinlichkeit von ca. 68 % (1 Sigma) beziehungsweise 99 % (3 Sigma) besteht, dass die geschätzte Position um weniger als jeweils $1 \times KQ$ oder $3 \times KQ$ von der tatsächlichen Position abweicht (LEICA GEOSYSTEMS 2000). Die Bezeichnung „Zuverlässigkeit“ beschreibt den prozentualen Anteil der Fälle, in denen der Positionsfehler weniger als das Einfache beziehungsweise Dreifache des jeweiligen KQ-Wertes beträgt. Tabelle 2 enthält die Zuverlässigkeitswerte unter

Berücksichtigung aller 1.075 Messungen. Aus Tabelle 2 lässt sich erkennen, dass der geschätzte KQ-Wert einen verlässlichen Indikator für die Unsicherheit des bildbasierten Messsystems darstellt. Die Testdaten zeigen, dass der 3D-Fehler einer visuellen Punktmessung mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % weniger als $3 \times KQ$ beträgt.

Tabelle 2: Zuverlässigkeit der 1.075 Testmessungen mittels visueller Punktbestimmung.

	Gesamt (3D) [%]	Lage (2D) [%]	Höhe (1D) [%]
Fehler < $1 \times KQ$	76,5	79,3	49,2
Fehler < $3 \times KQ$	99,6	99,2	88,4

3.2 Genauigkeit der Distanzmessung

Ein weiterer Vorteil des bildbasierten Vermessungsansatzes besteht darin, dass bei der Distanzmessung zwischen zwei Punkten eine hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Da die Fehlerquellen, die die globale Koordinatenschätzung mittels GNSS beeinträchtigen, durch die Differenzenbildung bei der Distanzberechnung weitgehend reduziert werden. Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, stellen die aus den Bildaufnahmen extrahierten Features eine geometrische Verbindung zwischen den Bildern her und die anschließende Bündelausgleichung verfeinert die relative Kameraorientierung und -position. Daher lässt sich die Entfernung zwischen zwei Objektpunkten derselben Bildgruppe millimetergenau bestimmen, da die systematischen Fehler der GNSS-Positionierung an den beiden Punkten vergleichbar sind und nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Distanzmessung ausüben.

Zur Bewertung der erreichbaren Genauigkeit der Distanzmessung wurden die Entfernungen zwischen zwei Punkten in derselben Bildgruppe gemessen. Dabei wurden an einer Gebäudefassade drei Distanzen mit unterschiedlichen Längen (1,410 m, 2,098 m, 9,212 m) und Orientierungen, wie in Abbildung 7 ersichtlich ist, definiert. Jede dieser drei Distanzen wurde in 69 Bildgruppen gemessen, wobei die Referenzentfernungen mithilfe einer Totalstation hochgenau ermittelt wurden.

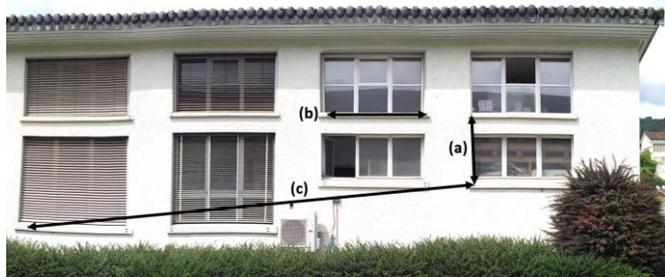


Abb. 7: Definierte Distanzen an einer Gebäudefassade (a=1,410 m, b=2,098 m, c=9,212 m) zur Beurteilung der Genauigkeit der Distanzmessung.

Tabelle 3 enthält die Fehlerstatistiken der jeweiligen 69 Distanzmessungen basierend auf visueller Punktbestimmung. Dabei lässt sich erkennen, dass die Genauigkeit der Distanzmessungen im Millimeterbereich möglich ist. Tatsächlich liegt der Distanzfehler in ca. 85 % der Fälle unter 1 cm (SCHAUFLER et al. 2020). Dies bedeutet, dass Vermessungsaufgaben, wie zum Beispiel Längen- und Flächenmessungen, aufgrund dieser hohen Genauigkeit der Distanzmessung noch effizienter und benutzerfreundlicher durchgeführt werden können.

Tabelle 3: Fehlerstatistiken der Distanzmessungen basierend auf visueller Punktbestimmung (RMS: root mean square).

	Distanz (a) [m]	Distanz (b) [m]	Distanz (c) [m]
Mittelwert	0,005	0,004	0,012
Standardabweichung	0,003	0,003	0,007
RMS-Fehler	0,006	0,005	0,014

4 Punktwolkenerstellung

Eine weitere Anwendung, die mit dem Leica GS18 I ermöglicht wird, ist die Erstellung von Punktwolken. Dabei wird die Technik Structure from Motion (SfM) eingesetzt, bei der eine Reihe zweidimensionaler Bilder verwendet wird, um die dreidimensionale Struktur einer Szene oder eines Objekts zu rekonstruieren. Das SfM-Verfahren ist in der Lage, punktwolkenbasierte 3D-Modelle, ähnlich wie LiDAR, zu erstellen, wobei mehrere Bilder eines Bereichs oder eines Objekts mit einer hohen Überlappung aus verschiedenen Perspektiven benötigt werden. Dazu können die Bildgruppen, die mit dem Leica GS18 I beim Vorbeigehen des gewünschten Objektes aufgenommen worden sind, verwendet werden.

Die Vermessungssoftware Leica Infinity verwendet Merkmale, die in mehreren Bildern auffindbar sind, und erzeugt dadurch eine 3D-Punktwolke der aufgenommenen Szene. Dabei können verschiedene Mindestanforderungen in der Software eingestellt werden, wie zum Beispiel die Anzahl der Bilder pro Punkt oder die Punktdichte (BODZIAK 2020). Aufgrund der bekannten Standorte im GNSS-Bezugsrahmen sowie der ermittelten Aufnahmewinkeln der Kameraposen, ist die resultierende Punktwolke ebenfalls georeferenziert. Somit entfällt eine Georeferenzierung der Punktwolke mittels Passpunkte und Bildgruppen passen zusammen wie auch manuell gemessene GNSS-Punkte.

Als Beispiel zeigt Abbildung 8 eine Punktwolke, die aus zwei Bildgruppen erzeugt wurde. Die gesamten Bilddaten wurden mit dem Leica GS18 I erfasst, um einen Erdaushub zu digitalisieren und anhand der generierten Punktwolke eine Volumenberechnung effizient vornehmen zu können. Da diese Punktwolke bereits georeferenziert ist, können weitere Vermessungsaufgaben, wie Einzelpunktbestimmungen aus der Punktwolke, ausgeführt werden. Eine auf diese Weise erzeugte Punktwolke kann als adäquate Ergänzung zu UAV-Befliegungen dienen. Punktwolken von Objekten und Bereichen, die von der Luft aus nicht ersichtlich sind, wie Gebäudefassaden, können effizient mit dem Leica GS18 I generiert werden, um eine durchgängige Punktwolke zu erhalten.

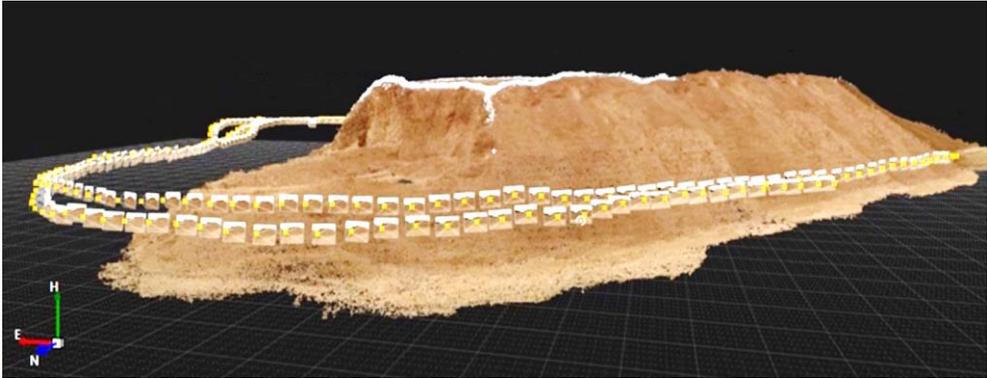


Abb. 8: Beispiel einer in Leica Infinity erzeugten Punktwolke eines Erdaushubes.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Vermessungsansatz zur visuellen Punktbestimmung vorgestellt, der erstmals mit dem Leica GS18 I in Form einer GNSS-Smartantenne realisiert wurde. Mithilfe der Kombination von GNSS/IMU mit terrestrischer Photogrammetrie sind hochpräzise Fernpunktmessungen direkt im Feld möglich. Georeferenzierte, zentimetergenaue Punktmessungen sind sogar an den Orten möglich, an denen ein herkömmlicher GNSS-Rover keine zuverlässigen Ergebnisse liefern kann. Die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen unter realen Messbedingungen zeigen, dass die Fusion der Photogrammetrie mit einem GNSS/IMU-System ein enormes Potenzial für hochpräzise Vermessungsanwendungen aufweist. Die wichtigsten, aus den Studien gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die photogrammetrischen Messungen werden direkt innerhalb eines globalen, durch GNSS festgelegten Referenzrahmens georeferenziert, ohne zusätzliche Nachbearbeitungsschritte beispielsweise mithilfe von Bodenkontrollpunkten durchführen zu müssen.
- Die Bereiche, die für einen herkömmlichen GNSS-Rover nicht zugänglich sind, können nun direkt und ohne zusätzliche Instrumente (z. B. Totalstation) vermessen werden und die Auswertung kann bereits im Feld erfolgen.
- Dank des vorgestellten Vermessungsverfahrens sind hochpräzise Fernpunktmessungen möglich, wobei die 2D- und 1D-RMS-Fehler jeweils 2,9 cm und 2,5 cm betragen.
- Die Koordinatenqualität (KQ) stellt einen zuverlässigen Indikator für die Positionsgenauigkeit dar. Die Ergebnisse zeigen, dass der 3D-Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % weniger als das Dreifache des korrespondierenden KQ-Wertes beträgt.
- Die Entfernungs- und Flächenmessungen innerhalb derselben Bildgruppe können mit Millimetergenauigkeit ausgeführt werden.
- Es können Punktwolken aus GS18 I Bildgruppen erzeugt werden, die bei Vermessungsaufgaben wie Volumenkalkulationen zum Einsatz kommen.

Der hier vorgestellte technologischen Ansatz des Leica GS18 I, eines innovativen und bildbasierten Multi-Sensorsystems, gewährleistet effiziente Arbeitsabläufe in hochpräzisen Vermessungsanwendungen. Die Kombination von Photogrammetrie mit einem GNSS/IMU-System bietet enormes Potenzial für terrestrische Vermessungsaufgaben, bei denen georeferenzierte Daten innerhalb kürzester Zeit benötigt werden.

Literaturverzeichnis

- BODZIAK, M. (2020): Leica Infinity: How to work with Leica GS18 I data. <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/software/leica-infinity/work-with-gs18-i-data> (06.11.2020).
- DUSHA, D. (2017): Surveying system and method. US-Patent US9541392B2.
- GROVES, P. D. (2013): Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems (zweite Auflage). Artech House, Boston London, 800 S.
- HARTLEY, R., ZISSERMAN, A. (2003): Multiple View Geometry in Computer Vision (zweite Auflage). Cambridge University Press, Cambridge, 655 S.
- JEKELI, C. (2001): Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. Walter de Gruyter, Berlin New York, 352 S.
- KRAUS, K. (2007): Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans (zweite Auflage). Walter de Gruyter, Berlin Boston, 459 S.
- LEICA GEOSYSTEMS (2000): What does the CQ really mean? GPS Newsletter – Sensor, 00/16, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 28. August 2000.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., BOEHM, J. (2013): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (zweite Auflage). Walter de Gruyter, Berlin, Boston, 702 S.
- LUO, X., CHEN, J., RICHTER, B., SCHLEUBINGER, K. (2018a): Hochpräzise RTK-Positionierung mittels Galileo – Welche Vorteile sind von der aktuellen Konstellation zu erwarten? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 125(6), 180–190.
- LUO, X., SCHAUFLE, S., CARRERA, M., CELEBI, I. (2018b): High-precision RTK positioning with calibration-free tilt compensation. In: Proceedings of FIG Congress 2018, Istanbul, Türkei, 6.–11. Mai 2018, 17 S.
- LUO, X., SCHAUFLE, S., RICHTER, B. (2018c): Leica GS18 T – World’s fastest GNSS RTK rover. Whitepaper, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 20 S.
- LUO, X., SCHAUFLE, S., BRANZANTI, M., CHEN, J. (2020): Assessing the benefits of Galileo to high-precision GNSS positioning – RTK, PPP and post-processing. Advances in Space Research, online publiziert. DOI: 10.1016/j.asr.2020.08.022.
- MAJERIC, M. (2020): Q&A on Visual Positioning and Leica GS18 I. <https://www.leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18i/of-visual-positioning-gs18-i> (06.11.2020).
- SCHAUFLE, S., FISCHELL, M., BOFFI, G., LUO, X., TÖRÖK Z., (2020): An innovative image-based surveying approach for globally referenced remote point measurements. In: Proceedings FIG Congress 2020, Amsterdam, Netherlands, 10.–14. Mai 2020, 13 S.
- SIERCKS, K., METZLER, B., VAN DER ZWAN, E. (2019): Surveying system. US-Patent US10359283B2.
- TITTERTON, D., WESTON, J. L. (2004): Strapdown Inertial Navigation Technology (zweite Auflage). IEE Radar, Sonar, Navigation, and Avionics Series, No. 17, Institution of Engineering and Technology, Stevenage Herts, 558 S.