

Ein systematischer Vergleich zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung von Mobile Mapping-Stereosequenzen in einem anspruchsvollen Stadtgebiet

STEFAN CAVEGN^{1,2}, STEPHAN NEBIKER¹ & NORBERT HAALA²

Mobile Mapping Systeme erlauben eine effiziente Erfassung von Multi-View Bildsequenzen. Um genaue Messungen in einem gegebenen Referenzrahmen durchführen zu können, ist aber eine Georeferenzierung höchster Qualität dieser Bildsequenzen gefordert. Ausserdem sind Sub-Pixel genaue relative Orientierungen dieser hochredundanten Sequenzen für eine dichte Bildkorrelation als Basis für die Generierung von 3D Punktwolken und Vermaschungen notwendig. Während die direkte Georeferenzierung von Mobile Mapping Daten in offenen Bereichen zu guten Resultaten führt, erschwert eine unzureichende GNSS Abdeckung in Strassenschluchten auch bei Verwendung von hochwertigen Inertial-Navigations-Sensoren die Erfüllung der hochgenauen Anforderungen. Somit wurden systematische Untersuchungen vorgenommen, um die Qualität der direkt bestimmten Sensororientierungen wie auch die erwartete Verbesserung durch bildbasierte Georeferenzierung in einem anspruchsvollen Stadtgebiet mit regelmässigen GNSS Ausfällen zu ermitteln. Die Untersuchungen lieferten wiederholt mittlere Trajektorienunterschiede von bis zu 80 cm. Durch bildbasierte Georeferenzierung mit Bündelausgleichung sowie einer limitierten Anzahl Kameras und Passpunkte konnten mittlere Kontrollpunkt-Residuen von ca. 40 cm auf 4 cm vermindert werden. Auch konnte aufgezeigt werden, dass die bildbasierte Georeferenzierung in der Lage ist, Unstetigkeiten von direkt georeferenzierten Trajektorien zu detektieren und zu kompensieren.

1 Einleitung

Bildbasiertes Mobile Mapping hat sich in den letzten Jahren zu einer sehr effizienten Kartierungstechnologie entwickelt. Im Gegensatz zu luftbildgestützten Anwendungen, wo die Bodenauflösung über das ganze Kartierungsgebiet konstant bleibt, treten bei fahrzeuggestütztem Mobile Mapping grosse Tiefenunterschiede auf. Im vorliegenden Fall entspricht ein Pixel 2-6 mm im Objektraum für einen gewöhnlichen Messbereich von 4-14 m und ist 1 cm bei einer Distanz von 23 m. Während typische Anwendungen der Infrastrukturverwaltung häufig 3D Messgenauigkeiten besser als 10 cm voraussetzen, werden für städtische Kartierungsarbeiten absolute Genauigkeiten im Zentimeterbereich gefordert. Diese Anforderungen konnten in offenen Gebieten bereits in früheren Arbeiten erfüllt werden. BURKHARD et al. (2012) erreichten mit ihrem stereobildbasierten Mobile Mapping System bei mittleren bis guten GNSS Bedingungen absolute 3D Punktmessgenauigkeiten von 4-5 cm. Dass das StreetMapper LiDAR Mobile Mapping System unter guten GNSS Bedingungen 3D Messungen im Bereich von 3 cm ermöglichen kann, wurde von HAALA et al. (2008) demonstriert. Eine andere Version dieses

¹ Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz, E-Mail: [stefan.cavegn, stephan.nebiker]@fhnw.ch

² Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Systems ist in PUENTE et al. (2013) vorgestellt, die einen Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener mobiler Laserscanning Systeme präsentieren. Die GNSS Bedingungen der strassenbasierten Mobile Mapping Systeme werden aber häufig durch Signalabschattungen und Mehrwegeeffekte verschlechtert, was die Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen durch direkte Georeferenzierung verunmöglicht. Auch betragen die Distanzen zwischen den Kameras und den zu messenden Objekten einige Meter, im Gegensatz zu Luftbildanwendungen mit einigen hundert Metern. Verglichen mit einer Orientierungsungenauigkeit wirken Ungenauigkeiten in der GNSS Positionierung dementsprechend weitaus stärker auf die Endgenauigkeit aus. Da Luftbildkampagnen viel weniger von GNSS Verschlechterungen betroffen sind, stellten NEBIKER et al. (2012) die Fusion von boden- und flugzeugbasierten Bilddaten vor. Erste Untersuchungen ergaben horizontale Genauigkeiten im Bereich von 5 cm, was der Bodenauflösung der Luftbilddaten entspricht, und Höhengenaugigkeiten von ca. 10 cm.

Eines der Hauptmerkmale unseres Mobile Mapping Systems ist das Vorliegen mehrerer Kameras, die durch Multi-View Stereo Matching für eine dichte 3D Datenerfassung verwendet werden können (CAVEGN et al. 2015). Hierfür werden aber genaue relative Orientierungen der Bildsequenzen vorausgesetzt, möglichst im Sub-Pixel Bereich. Die Ausnutzung der gut co-registrierten hochredundanten Multi-View Bildsequenzen kann dann zu einer Steigerung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit resultierender Produkte wie Tiefenkarten, 3D Punktwolken und Vermaschungen führen.

Eine integrierte Georeferenzierung ist in Stadtgebieten mit ausgedehnten Bereichen schlechter GNSS Abdeckung unerlässlich, besonders wenn Daten an unterschiedlichen Tagen und Tageszeiten, was typisch bei der Kartierung ganzer Städte ist, kombiniert werden sollen (NEBIKER et al. 2015). Im Gegensatz zur direkten Georeferenzierung, die ausschliesslich auf Positions- und Orientierungsdaten vom GNSS/INS basiert, verwendet die integrierte Georeferenzierung häufig vorberechnete Kamerapositionen in der Bündelausgleichung. ELLUM & EL-SHEIMY (2006) schlagen vor, Koordinatenupdates (CUPTs) aus einer photogrammetrischen Bündelausgleichung in einer zweiten Iteration im Loosely-Coupled GNSS Kalman Filter einzuführen. Dieser Ansatz wurde später von EUGSTER et al. (2012) verwendet, womit sie die absolute 3D Messgenauigkeit für strassenbasiertes Mobile Mapping von einigen Dezimetern auf 5-10 cm reduzieren konnten. HASSAN et al. (2006) führen eine Bündelausgleichung unter Verwendung von Kamerapositionen und -orientierungen aus einem Kalman Filter durch. In schlechten GNSS Bereichen reduzieren die Gewichte dieser äusseren Orientierungsparameter gegen Null, was dazu führt, dass nur noch Bildbeobachtungen berücksichtigt werden. Ähnliche Ansätze des Photogrammetrischen Bridging wurden auch von FORLANI et al. (2005) und von SILVA et al. (2014) entwickelt, um strassenbasierte Mobile Mapping Stereobildsequenzen in Gebieten ohne GNSS Empfang zu überbrücken.

2 Mobile Mapping System und Messfahrten

Um Genauigkeitsuntersuchungen zur Georeferenzierung vornehmen zu können, wurden zwei Mobile Mapping Kampagnen mit unterschiedlichen Sensorkonstellationen durchgeführt. Diese Messfahrten wie auch das Untersuchungsgebiet werden in den folgenden zwei Abschnitten vorgestellt.

2.1 Mobile Mapping System

Alle Daten für diesen Beitrag wurden mit dem Multi-Sensor Stereobild Mobile Mapping System vom Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) erfasst. Obwohl zwei Messfahrten mit unterschiedlichen Sensorkonstellationen durchgeführt wurden, fokussieren die folgenden Untersuchungen auf Stereobilddaten des Hauptsystems nach vorne, das aus zwei 11 MP Kameras und einer kalibrierten Stereobasis von 905 mm besteht. Diese Stereokameras haben je eine Auflösung von 4008 x 2672 Pixel bei einer Pixelgrösse von 9 μm , eine Kamerakonstante von 21 mm und resultierende Sichtfelder von 81° in horizontaler und 60° in vertikaler Richtung. HD Kameras mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixel, einer Pixelgrösse von 7.4 μm , einer Kamerakonstante von 8 mm und einem Sichtfeld von 83° x 53° komplettieren die Multi-Kamera Konfiguration. Bei der Messfahrt im Juli 2014 wurden zwei zusätzliche Stereobasen mit solchen Kameras mitgeführt, bei der Messfahrt im August 2015 lediglich eine dritte HD Kamera in der Mitte der 11 MP Kameras (siehe Abb. 1). Für die direkte Georeferenzierung wurde ein Inertial-Navigation-System vom Typ NovAtel SPAN verwendet. Bei guter GNSS Verfügbarkeit können mit Nachprozessieren horizontale Genauigkeiten von 10 mm und vertikale von 15 mm erreicht werden (NOVATEL 2016). Genauigkeiten der Orientierungswinkel Roll und Nick sind mit 0.005° spezifiziert, Gier mit 0.008°. Ein GNSS Ausfall von 60 Sekunden vermindert die horizontale Genauigkeit auf 110 mm und die vertikale auf 30 mm.



Abb. 1: Mobile Mapping System des IVGI (links), Sensor-Konfiguration für die Messfahrt Juli 2014 (rechts oben) und für die Messfahrt August 2015 (rechts unten)

2.2 Untersuchungsgebiet und Messfahrten

Das Untersuchungsgebiet in Abb. 2 umfasst eine verkehrsreiche Kreuzung mit fünf Strassen im Stadtzentrum von Basel. Grosse Geschäftsgebäude erschweren die GNSS Verfügbarkeit in den Strassenschluchten. Drei Strassenabschnitte dieses Untersuchungsgebiets wurden dreimal kartiert, einmal im Juli 2014 und zweimal am gleichen Tag im August 2015 (siehe Tab. 1). In allen neun Fällen erfolgte die Datenerfassung kurz vor Mittag und bei guten Wetterbedingungen. Für die Untersuchungen wurden 85 bis 191 Stereobildpaare vom vorwärts gerichteten Stereokamerasystem bei einer Sequenzlänge zwischen 108 m und 217 m verwendet. Es wurde eine Distanz zwischen nachfolgenden Projektionszentren von 1 m beabsichtigt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von mehr als 18 km/h erhöhte sich aber dieser Abstand, da die maximale Bildrate pro Sekunde 5 betrug.

Während die Kampagne im Juli 2014 Teil einer vollständigen Befahrung des Kantons Basel-Stadt war, wurde die Messfahrt im August 2015 spezifisch für unser Untersuchungsgebiet angelegt (siehe Abb. 2). Um optimale Trajektorien zu erzielen, erfolgte die kinematische Datenerfassung nach einem vom Hersteller empfohlenen Verfahren. Somit wurde zuerst eine statische Initialisierung von ca. 3 Minuten in einem offenen Bereich durchgeführt. Es folgte ein Einfahren und die erste Kartierung des Untersuchungsgebiets. Nach einer zusätzlichen Schleife wurde das Untersuchungsgebiet zum zweiten Mal kartiert und nachdem der Startbereich erreicht wurde, wurden Bilddaten vom Kalibrierfeld für die Bestimmung von Hebelarm und Fehlansrichtung erfasst. Eine letzte Schleife diente fürs Ausfahren gefolgt von einer statischen Beobachtung von etwa 4 Minuten in der Nähe des FHNW Gebäudes. Die GNSS Antenne auf dem Dach dieses Gebäudes diente als Basisstation. Die komplette Messfahrt lieferte 12220 Stereobildpaare über eine Länge von 22.756 km und eine Erfassungszeit von etwas mehr als einer Stunde.

Für die Untersuchungen wurden 51 Punkte vorwiegend an Ecken von Strassenmarkierungen mit einer 3D Genauigkeit von besser als 1 cm durch Tachymetrie erfasst. Diese 3D Punkte dienten entweder als Passpunkte (PP) oder als Kontrollpunkte (KP) (siehe Abb. 2 und Abb. 6).

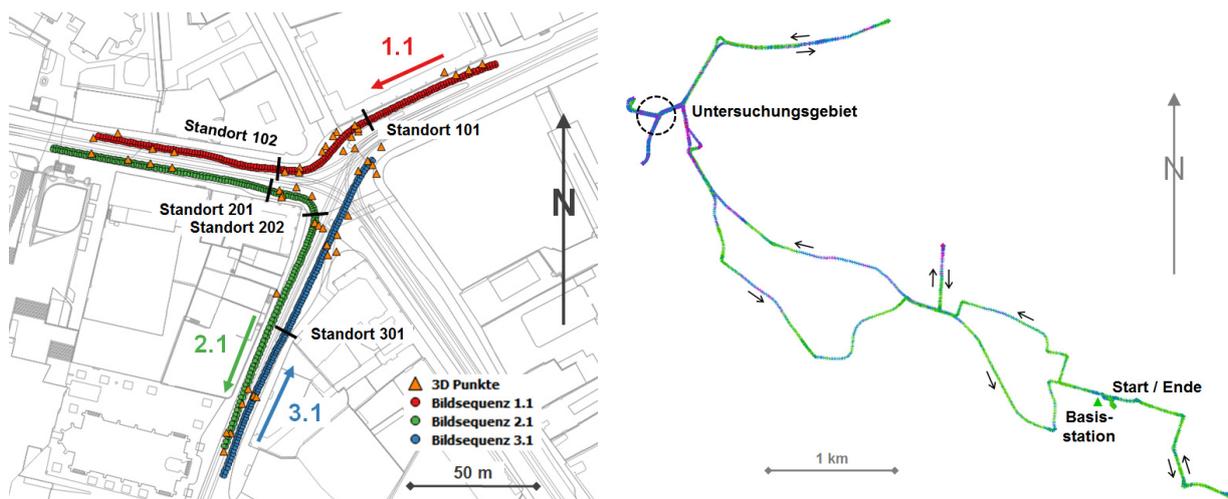


Abb. 2: Grundlagekarte des Untersuchungsgebiets mit überlagerten Projektionszentren ausgewählter Stereobildsequenzen, 3D Referenzpunkte und Standorte der Trajektorienunstetigkeiten (links, Quelle: Geodaten Kanton Basel-Stadt); Trajektorie der Messfahrt August 2015 (rechts)

Tab. 1: Kenndaten der neun gewählten Stereobildsequenzen x.y (x entspricht den Strassenabschnitten 1 bis 3 und y entspricht der Kampagne, 0 = 24./27.7.14, 1 = 20.8.15 10:30-10:37, 2 = 20.8.15 10:47-10:53)

Sequenz	Datum und Uhrzeit	Anzahl Bilder	Länge [m]	Distanz in Fahrtrichtung [m]	
				Mittelwert	Maximum
1.0	24.7.2014 10:20	246	164	1.34	1.97
1.1	20.8.2015 10:30	322	173	1.08	1.25
1.2	20.8.2015 10:47	312	175	1.13	1.48
2.0	27.7.2014 11:53	314	173	1.11	1.60
2.1	20.8.2015 10:34	342	212	1.25	2.06
2.2	20.8.2015 10:50	382	217	1.14	1.93
3.0	27.7.2014 11:57	170	108	1.29	1.49
3.1	20.8.2015 10:37	232	141	1.23	1.73
3.2	20.8.2015 10:53	192	146	1.54	2.37

3 Kalibrierung und Trajektorienprozessierung

Alle Bildsensoren des Mobile Mapping Systems wurden in einem umfangreichen Prozess kalibriert. Dieser beinhaltete zuerst die Bestimmung der inneren wie auch der relativen Orientierungsparameter zwischen allen Kameras. Hierfür erfolgte jeweils eine Bündelausgleichung aufgrund von Bilddaten eines Innenraum-Kalibrierfeldes, das viele codierte Zielmarken aufweist. In einem zweiten Schritt folgte die Bestimmung von Hebelarm und Fehlansrichtung zur linken Kamera des vorwärts gerichteten Stereosystems durch Verwendung von Bildern, die vom Aussenraum-Kalibrierfeld aufgenommen wurden (BURKHARD et al. 2012). Für die Bestimmung der direkten Georeferenzierung wurden die erfassten Navigationsdaten mit der Software Inertial Explorer von NovAtel prozessiert. Dies erfolgte im Tightly-Coupled Modus in mehreren Richtungen gefolgt von einer Glättung der Trajektorien. Abb. 2 kann entnommen werden, dass die Trajektorie im Untersuchungsgebiet nur eine mittlere bis niedrige Qualität aufweist. Unter Berücksichtigung der vorgängig berechneten Fehlansrichtung und Hebelarm wie auch der relativen Orientierungsparameter konnte die direkte Sensororientierung für alle Bilder bestimmt werden.

Die bildbasierte Georeferenzierung durch Bündelausgleichung aller neun Stereobildsequenzen erfolgte mit Agisoft PhotoScan. Dabei wurden die äusseren Orientierungsparameter von der direkten Georeferenzierung wie auch etwa 20 Passpunkte pro Sequenz miteinbezogen. Es resultierten mittlere Gesamt-Rückprojektionsfehler in der Grössenordnung von 0.42-0.89 Pixel. Während Rückprojektionsfehler für Verknüpfungspunkte im Bereich von 0.15-0.21 Pixel liegen, betragen diese 0.81-1.08 Pixel bei den Passpunkten. Werte von etwa 1 Pixel sind aber plausibel, da die Identifikation und die manuelle Messung der Passpunkte nicht trivial sind (siehe Abb. 3). Eine detaillierte Zusammenstellung aller Werte ist in CAVEGN et al. (2016) ersichtlich.



Abb. 3: Ein Beispielbild für alle 3D Punkte der Stereobildsequenz 2.1

4 Genauigkeit von Trajektorien und Kontrollpunkten

Im Folgenden sind die Ergebnisse der systematischen Untersuchungen dokumentiert, die es zum Ziel hatten, die Qualität der direkt bestimmten Sensororientierungen und dessen Verbesserung durch bildbasierte Georeferenzierung in einem anspruchsvollen Stadtgebiet mit regelmässigen GNSS Ausfällen zu beurteilen. Um die Aussagekraft zu erhöhen, wurden zudem Kontrollpunktuntersuchungen für die direkte wie auch für die bildbasierte Georeferenzierung vorgenommen.

4.1 Trajektorien- und Orientierungsdifferenzen zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung

Differenzen der Projektionszentren und Orientierungswinkel zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung wurden für alle neun Sequenzen berechnet (siehe Tab. 2). Die 3D Differenzen liegen im Bereich von 46 bis 803 mm und die Höhe ist die Komponente mit den grössten Residuen, ausser bei Sequenz 3.2. Eher kleine Differenzen konnten für Strassenabschnitt 3 ermittelt werden. Sequenz 1.1 weist mit 0.5° die grössten Orientierungsdifferenzen für alle Orientierungswinkel auf. Es wurden aber mittlere Omega-Phi-Kappa Differenzen von 0.3° erreicht.

Tab. 2: Differenzen der Orientierungswinkel und Projektionszentren zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung

Sequenz	$\Delta\omega$ RMSE [$^\circ$]	$\Delta\phi$ RMSE [$^\circ$]	$\Delta\kappa$ RMSE [$^\circ$]	$\Delta\omega\phi\kappa$ RMSE [$^\circ$]	ΔO RMSE [mm]	ΔN RMSE [mm]	ΔH RMSE [mm]	$\Delta 3D$ RMSE [mm]
1.0	0.246	0.095	0.246	0.361	298	36	423	519
1.1	0.366	0.072	0.354	0.515	41	86	126	158
1.2	0.311	0.067	0.295	0.434	437	26	572	721
2.0	0.143	0.056	0.160	0.222	52	37	75	98
2.1	0.319	0.081	0.298	0.445	264	83	498	569
2.2	0.310	0.064	0.283	0.425	172	470	628	803
3.0	0.011	0.055	0.008	0.057	23	30	77	86
3.1	0.088	0.079	0.047	0.127	15	25	36	46
3.2	0.084	0.057	0.048	0.112	172	500	146	548
Mittel	0.209	0.070	0.193	0.300	164	144	287	394

Mögliche Verbesserungen der Projektionszentren-Differenzen und somit der Trajektoriengenauigkeit aus integrierter und bildbasierter Georeferenzierung im Vergleich zur direkten Georeferenzierung sind in Abb. 4 detailliert dargestellt. Trajektorien von Stereobildsequenzen der gleichen Strassenabschnitte weisen Differenzen von bis zu mehreren Dezimetern auf. Für Sequenzen 1.1 und 2.0 resultierten kleine Abweichungen. Diese sind aber signifikant grösser für die anderen Sequenzen dieser beiden Strassenabschnitte. Alle Differenzen von Strassenabschnitt 3 sind kleiner als 10 cm, mit Ausnahme der Nordkomponente von Sequenz 3.2 mit einem Wert von ca. 50 cm.

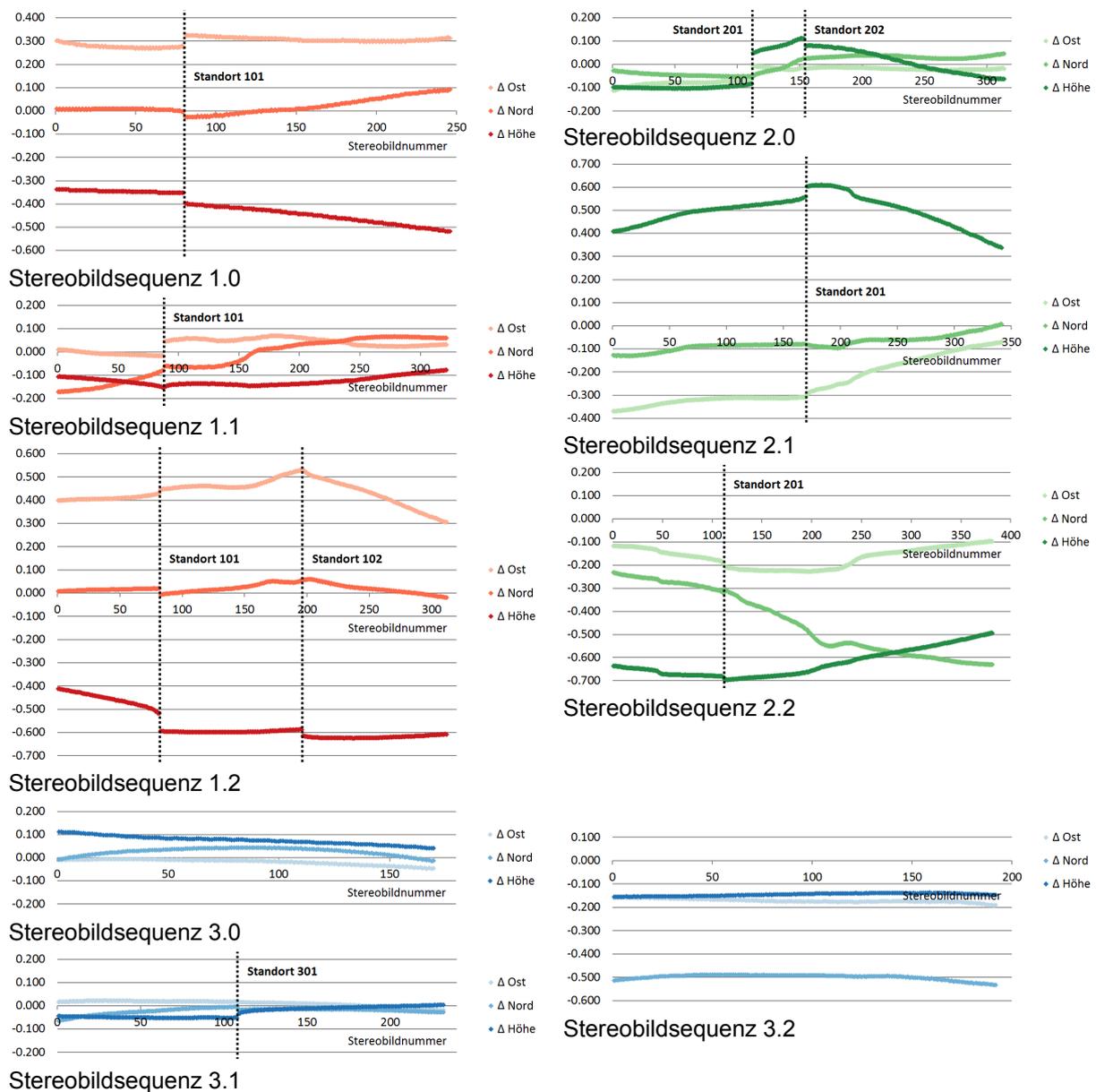


Abb. 4: Differenzen der Projektionszentren in m zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung

4.2 Trajektorienunstetigkeiten aus direkter Georeferenzierung

Die Diagramme mit den Trajektorienunterschieden zwischen direkter und bildbasierter Georeferenzierung zeigen neun Trajektorienunstetigkeiten. Diese sind jeweils mit einer gepunkteten vertikalen Linie gekennzeichnet (siehe Abb. 4). Gemäss Abb. 2 und Abb. 5 wurden alle ausser einer (Standort 202) durch einen Fahrzeug-Stopp von mehreren Sekunden verursacht, meistens vor Fussgängerstreifen. Es konnte aber keine Korrelation zwischen Stopp-Dauer und 3D Wert der Unstetigkeiten festgestellt werden (siehe Tab. 3). Die 3D Unstetigkeiten betragen grösstenteils einige Zentimeter, reichen aber bis zu ca. 15 cm bei Sequenz 2.0 und Standort 201.

Sequenzen 3.0 und 3.2 weisen keine Unstetigkeiten auf, wobei das Fahrzeug bei diesen auch nicht anhalten musste.

Tab. 3: Ausmasse der Trajektorienunstetigkeiten

Standort	Sequenz	Stopp [s]	ΔO [mm]	ΔN [mm]	ΔH [mm]	$\Delta 3D$ [mm]
101	1.0	17	48	-21	-43	68
101	1.1	13	62	19	4	65
101	1.2	31	17	-27	-76	82
102	1.2	68	-3	2	-29	29
201	2.0	19	57	4	132	144
201	2.1	56	17	-3	46	49
201	2.2	41	-16	16	-12	26
202	2.0	0	-5	0	-30	30
301	3.1	16	-3	-12	18	22



Standort 101, Sequenz 1.0



Standort 101, Sequenz 1.1



Standort 101, Sequenz 1.2



Standort 102, Sequenz 1.2



Standort 201, Sequenz 2.0



Standort 201, Sequenz 2.1



Standort 201, Sequenz 2.2



Standort 202, Sequenz 2.0



Standort 301, Sequenz 3.1

Abb. 5: Mobile Mapping Bilder die an Standorte der Trajektorienunstetigkeiten erfasst wurden

4.3 Untersuchungen mit Kontrollpunkten für die direkte und bildbasierte Georeferenzierung

In Kapitel 4.1 wurden die 3D Koordinaten der Kameratrajektorien aus direkter Georeferenzierung und Bündelausgleichung verglichen. Obwohl dies einige Hinweise auf die entsprechende Qualität gibt, sind Genauigkeitsuntersuchungen der 3D Koordinaten von gemessenen Bildpunkten aussagekräftiger. Für die Berechnung dieser 3D Koordinaten durch

Vorwärtseinschnitt können Orientierungsparameter aus direkter Georeferenzierung und Bündelausgleichung verwendet werden. Somit wurden Gruppen bestehend aus zwei, drei oder vier Passpunkten (PP) angelegt und etwa die Hälfte der vorgängig verwendeten Passpunkte als Kontrollpunkte (KP) definiert (siehe Abb. 6). Danach wurden Kontrollpunkt-Residuen für zwei Szenarien berechnet. Zuerst für jeweils eine Passpunktgruppe an den Enden der Segmente und danach mit zwei zusätzlichen Passpunktgruppen nahe der entsprechenden scharfen Kurve. Für Szenario 1 mit zwei Passpunktgruppen wurden mittlere Kontrollpunkt-Residuen von ca. 15 cm ermittelt. Dies ist etwa dreimal besser als ein Wert von ca. 40 cm für die direkte Georeferenzierung (siehe Tab. 4). Szenario 2 mit vier Passpunktgruppen lieferte Kontrollpunkt-Residuen im Bereich von 21-73 mm, was einer Verbesserung um eine Zehnerpotenz im Vergleich zur direkten Georeferenzierung entspricht.

Tab. 4: Kontrollpunkt-Residuen (RMSE) der direkten und bildbasierten Georeferenzierung

Sequenz	Anzahl KP	Direkt	Bildbasiert 2 PP-Gruppen		Bildbasiert 4 PP-Gruppen	
		$\Delta 3D$ [mm]	$\Delta 3D$ [mm]	Verb.-Faktor	$\Delta 3D$ [mm]	Verb.-Faktor
1.0	15	555	137	4.1	27	20.4
1.1	11	168	42	4.0	21	8.0
1.2	11	774	121	6.4	26	29.4
2.0	11	131	76	1.7	48	2.7
2.1	12	593	432	1.4	73	8.1
2.2	11	813	425	1.9	36	22.5
3.0	8	174	42	4.2		
3.1	10	64	30	2.1		
3.2	10	568	53	10.8		
Mittel		427	151	2.8	39	11.1

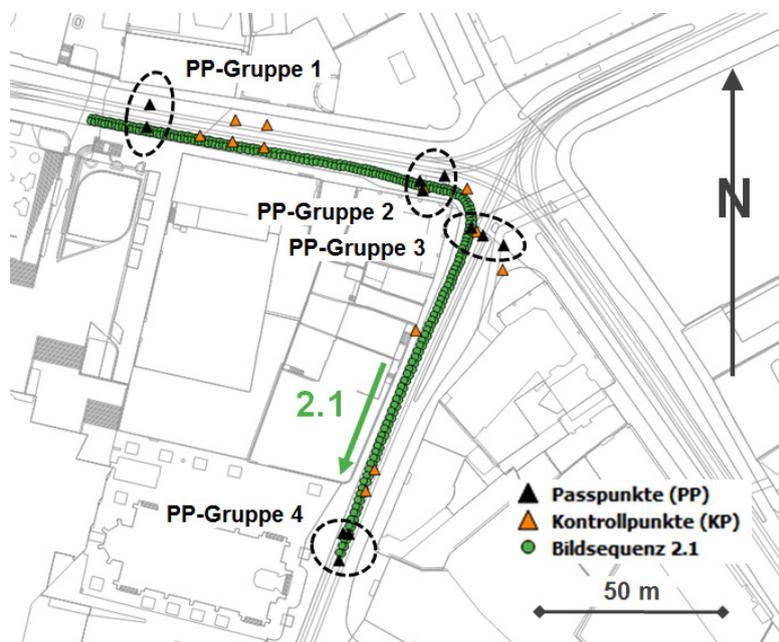


Abb. 6: Lage der Passpunktgruppen und Kontrollpunkte bei Stereobildsequenz 2.1 (Quelle: Geodaten Kanton Basel-Stadt)

5 Fazit und Ausblick

Umfassende Untersuchungen anhand von qualitativ hochstehender Referenz- und Bilddaten führten bei der direkten Georeferenzierung wiederholt zu 3D Trajektoriengenauigkeiten im Bereich von einem bis mehreren Dezimetern. Durch bildbasierte Georeferenzierung mit Bündelausgleichung und einigen Passpunkten konnten Objektpunktgenauigkeiten von ca. 4 cm konsequent erreicht werden, was einer Verbesserung um eine Zehnerpotenz entspricht. Da Bildbeobachtungen über die ganzen Sequenzen berücksichtigt wurden, konnten nicht nur grosse Offset- und Drift-Fehler der direkten Georeferenzierung eliminiert, sondern auch Trajektorienunstetigkeiten detektiert und kompensiert werden.

Die erreichten absoluten 3D Punktgenauigkeiten im Bereich von einigen Zentimetern erfüllen die Anforderungen typischer Anwendungen der Infrastrukturverwaltung. Die 3D Messungen basierten aber nur auf Bilddaten des vorwärts gerichteten Stereosystems und eine beträchtliche Anzahl Passpunkte ist noch immer notwendig. Effizienz und Genauigkeit werden künftig erhöht, indem Multi-View Stereobildsequenzen in der Bündelausgleichung berücksichtigt und zusätzlich Bedingungen für die kalibrierten Offsets und Rotationen zwischen den entsprechenden Kameras eingeführt werden. Die erreichten Sub-Pixel genauen relativen Orientierungen sind ausreichend, um eine dichte Bildkorrelation durchführen zu können. Die völlig unterschiedlichen Blickrichtungen erschweren jedoch die automatische Verknüpfungspunkt-Detektion und Zuordnung in Mobile Mapping Sequenzen. Dies wie auch die Entwicklung einer integrierten und bildbasierten Georeferenzierungslösung, um Bildsequenzen ganzer Städte zu prozessieren, werden bei künftigen Forschungsaktivitäten angegangen.

Anerkennung: Wir möchten uns bei der Firma iNovitas AG (Baden-Dättwil, Schweiz) und dem Kanton Basel-Stadt (Bau- und Verkehrsdepartement) für die Bereitstellung der Mobile Mapping-Daten von der Messfahrt Juli 2014 bedanken. Diese Arbeit wurde von der Kommission für Technologie und Innovation KTI im Rahmen des infraVIS-Projekts mitfinanziert.

6 Literaturverzeichnis

- BURKHARD, J., CAVEGN, S., BARMETTLER, A. & NEBIKER, S., 2012: Stereovision Mobile Mapping: System Design and Performance Evaluation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39**, Part B5, 453-458.
- CAVEGN, S., HAALA, N., NEBIKER, S., ROTHERMEL, M. & ZWÖLFER, T., 2015: Evaluation of Matching Strategies for Image-Based Mobile Mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2** (3/W5), 361-368.
- CAVEGN, S., NEBIKER, S. & HAALA, N., 2016: A Systematic Comparison of Direct and Image-Based Georeferencing in Challenging Urban Areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **41**, ICWG I/Va.
- ELUM, C. M. & EL-SHEIMY, N., 2006: New Strategies for Integrating Photogrammetric and GNSS Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36**, Part 5.

- EUGSTER, H., HUBER, F., NEBIKER, S. & GISI, A., 2012: Integrated Georeferencing of Stereo Image Sequences Captured with a Stereovision Mobile Mapping System – Approaches and Practical Results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39**, Part B1, 309-314.
- FORLANI, G., RONCELLA, R. & REMONDINO, F., 2005: Structure and Motion Reconstruction of Short Mobile Mapping Image Sequences. VII Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 265-274.
- HAALA, N., PETER, M., KREMER, J. & HUNTER, G., 2008: Mobile LiDAR Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**, Part B5, 1119-1124.
- HASSAN, T., ELLUM, C. & EL-SHEIMY, N., 2006: Bridging Land-Based Mobile Mapping Using Photogrammetric Adjustments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36**, Part 1.
- NEBIKER, S., CAVEGN, S., EUGSTER, H., LAEMMER, K., MARKRAM, J. & WAGNER, R., 2012: Fusion of Airborne and Terrestrial Image-Based 3D Modelling for Road Infrastructure Management – Vision and First Experiments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39**, Part B4, 79-84.
- NEBIKER, S., CAVEGN, S. & LOESCH, B., 2015: Cloud-Based Geospatial 3D Image Spaces – A Powerful Urban Model for the Smart City. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4** (4), 2267-2291.
- NOVATEL, 2016: SPAN UIMU-LCI. <http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/IMU-LCI.pdf> (28.4.2016).
- PUENTE, I., GONZÁLEZ-JORGE, H., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. & ARIAS, P., 2013: Review of Mobile Mapping and Surveying Technologies. *Measurement* **46** (7), 2127-2145.
- SILVA, J.F.C., LEMES NETO, M.C. & BLASECHI, V., 2014: Automating the Photogrammetric Bridging Based on MMS Image Sequence Processing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (1), 389-396.