

Integration relativer und globaler Orientierungsmethoden für eine bewegte Time-of-Flight-Kamera

SABINE HORVATH¹

Zusammenfassung: Ziel dieser Arbeit ist die Schätzung und die Präzisionssteigerung der Trajektorie einer bewegten Time-of-Flight Kamera. Einerseits wird die Kamera-Trajektorie diskret auf Basis der äußeren Orientierungen der Bündelblockausgleichung hergestellt, andererseits liefert der Range Optical Flow in den Amplituden- und Distanzbildern eine relative Orientierung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern. Durch Aufsummierung der einzelnen relativen Orientierungen erhält man ebenfalls die Kamera-Trajektorie. Basierend auf einem Vergleich dieser Ergebnisse, wird die Hypothese formuliert, dass die Integration beider Verfahren zu einer glatten, erwartungstreuen Trajektorie führt, der wahren Bewegung entsprechend. Aus diesem Grund werden die relativen Orientierungsergebnisse in die Bündelblockausgleichung integriert. Weiters werden auch die Distanzbeobachtungen der ToF-Kamera zu den Passpunkten in die Ausgleichung aufgenommen. Die geeignete Integration dieser Beobachtungen – Bild-, relative Orientierungs- und Distanzbeobachtungen – mit unterschiedlichen Präzisionen wird mittels der Varianzkomponentenschätzung durchgeführt. Die hybride Ausgleichung zeigt eine ermittelte Trajektorie, die der formulierten Hypothese entspricht und der wahren Bewegung der ToF-Kamera näher kommt. Außerdem kann eine Präzisionssteigerung erzielt werden. Die Modellierung der systematischen Distanzbeobachtungen stellt sich als unzureichend heraus und führt zu einer Verschlechterung des Ergebnisses.

1 Einleitung

Um ein Objekt aus Bildern einer bewegten Kamera modellieren zu können, muss die Position und die Stellung der Kamera im Raum zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme bekannt sein. Die Qualität des Modells hängt von der Qualität der Kamera Orientierung ab. Deswegen widmet sich diese Arbeit der Bestimmung und der Präzisionssteigerung der Kamera-Trajektorie.

Der verwendete Messsensor ist die ToF-Kamera SR-3000 – ein Prototyp der Firma Mesa Imaging. Bildraten von bis zu 25 Bildern pro Sekunde ermöglichen eine Aufnahme aus der Bewegung der Kamera heraus. Außerdem liefert die aktive Kamera eine Echtzeit-Punktwolke aufgrund der durchgeführten Distanzmessung in jedem Bildpunkt.

Zur Bestimmung der Orientierung der Kamera werden zwei indirekte Verfahren – ein Zielmarken- und ein Daten-basierendes Verfahren (siehe Kapitel 2) – verwendet. Diese beiden Methoden weisen Unzulänglichkeiten wie z.B. eine geringe Präzision und ein Abdriften der Trajektorie auf. Die dieser Arbeit zu Grunde liegende Hypothese ist, dass eine geeignete Kombination der Orientierungsverfahren eine präzise, erwartungstreue Trajektorie liefert.

Außerdem werden die Distanzmessungen der SR-3000 in die Ausgleichung einbezogen, um eine Stützung der Trajektorie zu erzielen.

¹ Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien;
E-Mail: sabine.horvath@tuwien.ac.at

2 Orientierungsmethoden

Die Kamera-Trajektorie wird auf Basis von zwei Orientierungsmethoden hergestellt. Das verwendete absolute Orientierungsverfahren ist die Bündelblockausgleichung (KRAUS 2004), die auf Bildbeobachtungen zu Zielmarken, deren Koordinaten im globalen System bekannt sind, aufbaut. Bilder verschiedenster Perspektiven können verwendet werden.

Die zweite Methode ist die relative Orientierung basierend auf dem Range Optical Flow gemäß GHUFFAR et al. (2013), der eine Kombination von Optical Flow und Range Flow vorschlägt. Diese ist nur anwendbar auf Bildsequenzen bzw. sehr ähnliche Bilder. Die Orientierung zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern wird anhand des kompletten Bildinhalts und nicht nur anhand von ausgewählten Punkten geschätzt.

2.1 Bündelblockausgleichung

Im Zuge der Bündelblockausgleichung wird die j -te äußere Orientierung einer Kamera geschätzt. Diese setzt sich aus der Position $\mathbf{p}_{0,j}$ und der Stellung der Kamera $\mathbf{R}_{\alpha,j}$ im globalen Koordinatensystem (C) zusammen. Die beobachteten Größen sind die Bildkoordinaten \mathbf{p}_{ij}'' der Zielmarken, sogenannte Passpunkte (\mathbf{p}_i). Die innere Orientierung der Kamera \mathbf{p}_0'' , die die Transformation zwischen Bild- (C'') und Kamera-Koordinatensystem (C') herstellt, ist KAREL & NIEDERMAYR (2010) entnommen. Die Kollinearität ist in Gleichung (1) dargestellt, wobei λ_{ij} den Skalierungsfaktor zwischen globalem und Kamera-System beschreibt.

$$\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{0,j} = \lambda_{ij} \mathbf{R}_{\alpha,j} (\mathbf{p}_{ij}'' - \mathbf{p}_0'') \quad (1)$$

2.2 Relative Orientierung basierend auf dem Range Optical Flow

Die k -te relative Orientierung ist, wie in Gleichung (2) dargestellt, definiert. Die Differenz-Rotation $\mathbf{R}_{\omega,k}$ und die Translation \mathbf{t}_k' zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kamerapositionen (j und $j+1$) bezieht sich auf die Position zum Zeitpunkt $j+1$.

$$\mathbf{p}'_{i,j+1} = \mathbf{R}_{\omega,k} \mathbf{p}'_{i,j} + \mathbf{t}_k' \quad (2)$$

Die relative Orientierung wird vom Range Optical Flow abgeleitet, der auf Kontrasten im Amplituden- (I) und Distanz-Bild (ρ) basiert. Der Optical Flow \dot{x}'', \dot{y}'' in Gleichung (3) ist jene Bildbewegung, die ein Amplitudenbild in das nächste transformiert. Ähnlich verhält sich der Range Flow in (4). Die beobachteten Größen sind die Veränderungen im Bild. I_x, I_y, ρ_x, ρ_y entsprechen den Ableitungen im Bild und I_t, ρ_t sind die Veränderungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern.

$$I_x \dot{x}'' + I_y \dot{y}'' + I_t = 0 \quad (3)$$

$$\rho_x \dot{x}'' + \rho_y \dot{y}'' + \rho_t = \dot{z} \quad (4)$$

Durch Bildung des Differenzen-Quotienten in Gleichung (2) und durch Substitution der Bildbewegung in (3) und (4), kann ein Übergang von der Bildebene auf das Kamera-Koordinatensystem geschaffen werden. Die relative Orientierung $\mathbf{R}_{\omega,k}, \mathbf{t}_k'$ wird auf Basis der beobachteten räumlichen I_x, I_y, ρ_x, ρ_y und zeitlichen I_t, ρ_t Ableitungen des Range Optical Flows in einer Ausgleichung bestimmt.

3 Integration der beiden Orientierungsmethoden

Da die Bündelblockausgleichung eine einfach erweiterbare Methode ist, wird die relative Orientierung in diese Ausgleichung integriert. Dafür muss ein funktionaler Zusammenhang zwischen den relativen Orientierungsergebnissen $R_{\omega,k}$, t_k' und den Unbekannten der Bündelblockausgleichung $R_{\alpha,j}$, $p_{0,j}$ bestimmt werden. In Abbildung 1 sind die Größen beider Orientierungsmethoden und deren Relation dargestellt.

Die k -te relative Orientierung ist die Differenz-Translation und -Rotation zwischen den Bildern $j+1$ und j . Die Gleichungen müssen als Beobachtungsgleichungen definiert werden. Der Differenz-Vektor t_k wird durch $R_{\alpha,j+1}^T$ in Gleichung (5) ins Kamera-Koordinatensystem C' transformiert. Die Differenz-Rotation $R_{\omega,k}$ erhält man gemäß Gleichung (6).

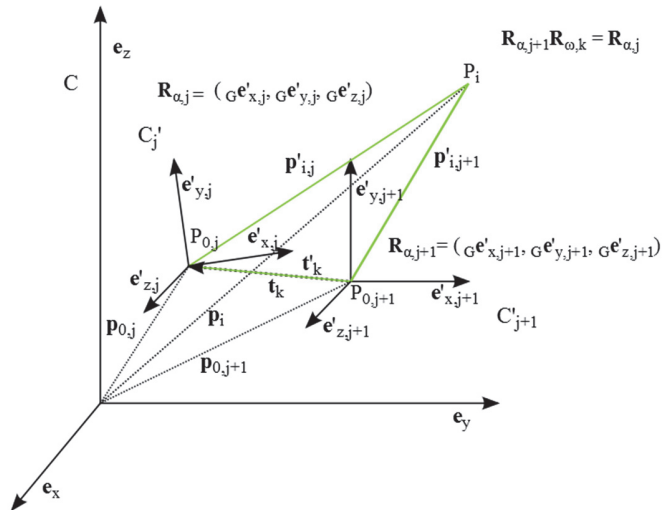


Abb. 1: Integration der beiden Orientierungsverfahren

$$t'_k = R_{\alpha,j+1}^T (p_{0,j} - p_{0,j+1}) \quad (5)$$

$$R_{\omega,k} = \begin{bmatrix} 1 & -\kappa_k & \varphi_k \\ \kappa_k & 1 & -\omega_k \\ -\varphi_k & \omega_k & 1 \end{bmatrix} = R_{\alpha,j+1}^T R_{\alpha,j} \quad (6)$$

Gleichung (5) und (6) zeigen, dass die relativen Orientierungsergebnisse durch die äußeren Orientierungen aufeinanderfolgender Bilder ausgedrückt werden können. Pro Bild erhält man zusätzlich zu den Bildbeobachtungen sechs relative Orientierungsbeobachtungen und keine weiteren Parameter. Gleichung (5) liefert drei Beobachtungsgleichungen; die Rotationsmatrix in Gleichung (6) enthält neun Elemente. Aufgrund der verwendeten kleine-Winkel-Approximation in $R_{\omega,k}$, werden die Elemente $R_{2,1}$, $R_{3,1}$ und $R_{3,2}$ den Winkeln entsprechend gewählt und diese bilden die restlichen drei Beobachtungsgleichungen.

Zusätzlich werden auch die Distanzmessungen zu den Passpunkten (7) in die Ausgleichung aufgenommen.

$$\rho_{ij} = \|p_{0,j} - p_i\| \quad (7)$$

Varianzkomponentenschätzung

Das Varianzniveau der Beobachtungen mit unterschiedlichen Präzisionen wird im Zuge der Varianzkomponentenschätzung gemäß NIEMEIER (2008) bestimmt. Das funktionale Modell wird pro Beobachtungsgruppe um einen Fehlerterm gemäß Gleichung (8) erweitert und dies erfolgt äquivalent für das stochastische Modell in (9), wobei v die Iterationsvariable darstellt. Die drei

Beobachtungsgruppen sind die Bild- (Img), die relativen Orientierungs- (ROF) und die Distanzbeobachtungen (R). Es wurden nur reihende Varianzkomponenten berücksichtigt.

$$l = A x + \epsilon_{Img} + \epsilon_{ROF} + \epsilon_R \tag{8}$$

$$\Sigma_{ll,v} = \alpha_{0Img,v}^2 Q_{Img} + \alpha_{0ROF,v}^2 Q_{ROF} + \alpha_{0R,v}^2 Q_R \tag{9}$$

4 Resultate

Evaluiert werden die Orientierungsmethoden und die Integration dieser anhand von zwei Datensätzen, die im bestehenden Messfeld (siehe Abb. 2) im Messkeller des Departements für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien aufgenommen wurden. Dabei wurde die SR-3000 auf einer Messschiene in der $e_x e_y$ -Ebene geradlinig rund 60 cm bewegt. Die Datensätze unterscheiden sich durch die gewählte Integrationszeit bei der Datenaufnahme.

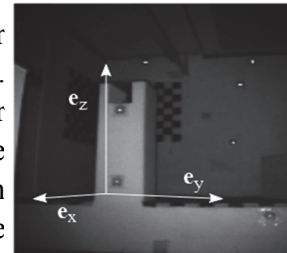


Abb. 2: Globales Koordinatensystem C

In Abbildung 3 ist die Kamera-Trajektorie, abgeleitet von der relativen Orientierung (ROF), der Bündelblockausgleichung (Img) und der integrierten Methode (Img+ROF), dargestellt. Der blaue Graph ist das Resultat der einzelnen äußeren Orientierungen (Bündelblock) und entspricht im Mittel der wahren Bewegung der Kamera. Die Streuung ist auf zufällige Fehler zurückzuführen. Die grüne Trajektorie entspricht den aneinandergereihten relativen Orientierungen. Dieser Graph zeigt zwar ein glattes Verhalten – der wahren Bewegung entsprechend, jedoch akkumuliert sich der Fehler jeder einzelnen relativen Orientierung zu einem absoluten Trajektorienfehler von rund 23 cm auf. Der rote Graph zeigt das Ergebnis der Integration von Bild- und relativen Orientierungs-beobachtungen.

Folgende Varianzkomponenten führen zu dieser Kombination der beiden Methoden:

$$\alpha_{0Img,v}^2 \approx 0.13; \alpha_{0ROF,v}^2 \approx 10^3$$

Die geschätzte relative Orientierungs-Varianzkomponente (ROF) zeigt, dass das stochastische Modell der relativen Orientierungen zu optimistisch geschätzt war. Dies ist auf eine künstliche Redundanzsteigerung im Zuge der relativen Orientierungsausgleichung zurückzuführen. Es werden nicht nur die Bereiche, die einen Beitrag zur Parameterschätzung leisten, verwendet; der komplette Bildinhalt fließt in die relative Orientierungsbestimmung ein.

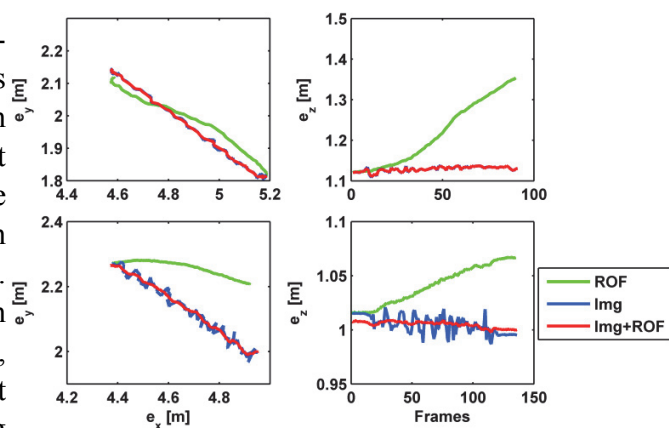


Abb. 3: Kamera-Trajektorie (Zeile 1: Datensatz 1; Zeile 2: Datensatz 2)

Das Bündelblockausgleichungsergebnis von Datensatz 1 (Abb. 3, Zeile 1) weist bereits eine hohe Präzision auf, dass eine Verbesserung nur schwer erkennbar ist (roter und blauer Graph beinahe deckungsgleich). Jedoch hat die Integration der beiden Methoden eine Präzisionssteigerung von 25 % zur Folge. Anhand von Datensatz 2 (Abb. 3, Zeile 2) kann die formulierte Hypothese bestätigt werden. Die Integration der beiden Methoden führt zu einer Trajektorie, der wahren Bewegung entsprechend. Der rote Graph weist einen glatten Verlauf auf und entspricht eher der horizontalen Aufnahme-richtung.

In Abbildung 4 ist das Ergebnis bei Hinzunahme der Distanzmessungen dargestellt. Der violette Graph wird vom Objekt, das sich in $e_y=0$ befindet, angezogen. Dieser Versatz der Trajektorie, verursacht durch zu kurz gemessene Distanzen, ist auf systematische Distanzfehler, die nicht modelliert wurden, zurück-zuführen.

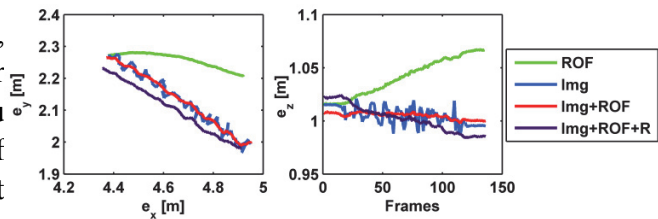


Abb. 4: Kamera-Trajektorie (Datensatz 2)

Es wurden systematische Distanzfehler in Abhängigkeit von Distanz, Amplitude, Integrationszeit und Position im Bild gemäß KAREL & NIEDERMAYR (2010) modelliert, jedoch liegt diese Kalibrierung der SR-3000 schon 4 Jahre zurück. Die Abweichungen der gemessenen Distanzen von den berechneten Referenz-Distanzen zeigen in Abbildung 5 unterschiedliche Systematiken. Die Passpunkte 127, 137 (Bildrand), 136 und 134 lassen auf einen noch vorhandenen Einfluss in Abhängigkeit von der Position im Bild schließen und die Passpunkte 323 und 324 weisen eine Distanzabhängigkeit auf. Systematische Distanzfehler, wie Multipath und Internal Scattering, die aufgrund der dynamischen Szene (Kontrast in Amplituden- und Distanzbildern) in den Messdaten vorhanden sind, wurden nicht berücksichtigt.

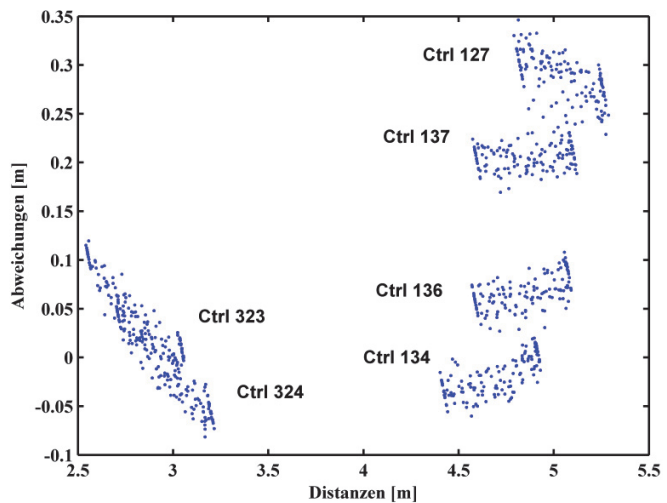


Abb. 5: Abweichungen zwischen gemessenen Distanzen und berechneten Referenzdaten in Abhängigkeit von der Distanz

5 Zusammenfassung

Die Hypothese kann bestätigt werden: die Kombination beider Orientierungsverfahren führt zu einer präzisen, erwartungstreuen Schätzung der Trajektorie, der wahren Bewegung der ToF-Kamera entsprechend.

Der Trajektorienfehler der Integration von Bild- und relativen Orientierungsbeobachtungen beläuft sich nun mehr auf 1.5 cm und die Präzision der Trajektorie konnte für Datensatz 1 um 25% und für Datensatz 2 um einen Faktor 3 verbessert werden.

Die Distanzmessungen der ToF-Kamera wurden unzureichend modelliert, systematische Distanzfehler sind nach wie vor in den Daten vorhanden.

Die Modellierung auftretender systematischer Distanzfehler, die relative Orientierungsausgleichung sowie die Varianzkomponentenschätzung zeigen Verbesserungs- bzw. Erweiterungspotential.

6 Literaturverzeichnis

GHUFFAR, S., RESSL, C. & PFEIFER, N., 2013: Relative orientation of videos from range imaging cameras. SPIE 8791, Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection, 879114.

KAREL, W. & NIEDERMAYR, S., 2010: Photogrammetrie + Laserscanning = Range Imaging. VGI 98, 2, 1-8.

KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1. De Gruyter.

NIEMEIER, W., 2008: Ausgleichungsrechnung. De Gruyter.