



Konzeption und Genauigkeitsabschätzungen für eine Bestimmung der äußeren Orientierung eines Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

FRANK NIEMEYER, RALF BILL & GÖRRES GRENZDÖRFFER, Rostock

Keywords: Orientierungsgenauigkeit, Unmanned Aerial Vehicle, terrestrische Zielverfolgung, Varianzfortpflanzung, Ausgleichsrechnung

Summary: This paper focuses on the development of a concept for determining the exterior orientation of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using a terrestrial system with target tracking tachometer, a reflector and additional coloured markers on board of the UAV. Two variants – a one-point solution and a stereo-solution – will be presented. All basic geometrical relations are derived. An accuracy assessment is carried out, based on the law of error propagation and the least squares method, integrating a Monte Carlo approach.

The results of the accuracy assessment show that the position accuracy (first part of exterior orientation) may be obtained in the sub-centimetre range. The accuracy of the rotations (roll, pitch, yaw) can be up to 0.2° . This concept seems to be very interesting for practical realisation especially in fields where

- 1) an UAV cannot be equipped with additional sensors and
- 2) geodetic and photogrammetric equipment are already used on-site (e.g. construction site monitoring).

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Konzept für eine Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV durch ein terrestrisches System bestehend aus einem zielverfolgenden Videotachymeter, einem Reflektor und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV entwickelt. Zwei Varianten – eine Einbild-Lösung und eine Stereolösung – werden unterschieden, und für beide Varianten werden die zugrundeliegenden geometrischen Beziehungen abgeleitet. Darauf aufbauend wird für jede der beiden Ansätze eine Genauigkeitsbetrachtung zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes und der Ausgleichsrechnung unter Einbeziehung der Monte Carlo Methode durchgeführt.

Die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzungen belegen, dass eine Positionsgenauigkeit im Subzentimeterbereich erreicht werden kann. Für die Orientierungswinkel ergeben sich Genauigkeiten bis zu etwa 0.2° . Somit erscheint eine solche Konzeption durchaus interessant für eine Umsetzung, insbesondere in solchen Bereichen, in denen

- 1) ein UAV aus Gewichtsgründen nicht mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet werden soll und in denen
- 2) geodätisch-photogrammetrisches Equipment wie z. B. Videotachymeter und Kamera sowieso vorhanden ist, z. B. für Baustellenüberwachung.

1 Einleitung

Georeferenzierte Bilder in unterschiedlichsten Spektralbereichen, gewonnen mit Methoden der Fernerkundung von Flugzeugen und Satelliten aus, bilden als Geodaten die Grundlage für Geo-Informationssysteme. Die

Nachfrage an hochauflösenden und aktuellen Bildern wächst. Gerade bei kleineren Gebieten sind flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme aber sehr teuer und unflexibel und zudem an die Wetterlage, speziell Wolkenbildung, gebunden. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) sind in der Lage, aus

geringeren Höhen unterhalb der Wolkendecke mit geringerer Geschwindigkeit sehr flexibel kleinere Gebiete zu überfliegen und Bilder bedarfsgerecht zu generieren. Heutige unbemannte Trägerplattformen verfügen teilweise über eine autonome Navigationseinheit, die sich mittels GNSS (global navigation satellite system) und IMU (inertial measurement unit) positioniert und stabilisiert und von einem Flight-Commander (Fernbedienung bzw. Autopilot) Befehle entgegennimmt. Solche UAVs sind in verschiedensten Formen und Typen bereits auf dem Markt (GRENZDÖRFFER & BILL 2010). Die Bandbreite reicht vom klassischen Motorsegler über Modellhelikopter und Quadrocopter bis hin zu neuartigen Multicoptern. Einen Überblick zur Klassifizierung von UAVs bieten EISENBEISS et al. (2009). Mit einem Gesamtgewicht von bis zu 5 kg können modernere Systeme bis zu 1,2 kg Nutzlast für etwa 30 min Flugzeit tragen. Aktuelle leichte hochauflösende Kamerasysteme können somit in Verbindung mit UAVs für Luftbilder genutzt werden. Leider stellt sich die Georeferenzierung dieser Luftbilder oft als unzureichend heraus, da die GNSS-Position i.d.R. über das EGNOS-DGNSS (European Geostationary Navigation Overlay Service, Differential Global Navigation Satellite System) im Bereich von 1–3 m und die Rotationsparameter um die Koordinatenachsen durch die IMU auf wenige Grad zu ungenau abgebildet werden.

Dieser Beitrag verfolgt den Ansatz einer Bestimmung der Position und Orientierung durch ein terrestrisches Messsystem. Sensorwerte von IMU oder GNSS sollen hierbei keine Rolle spielen. Ziel ist eine theoretische Genauigkeitsbetrachtung der äußeren Orientierungsparameter, die mit Hilfe von zielverfolgenden Videotachymetern, Reflektoren und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV bestimmt werden können. Als a priori Genauigkeitsmaße gehen gängige Standardabweichungen der von den Messinstrumenten gelieferten Beobachtungen in die Abschätzung ein. Mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes bzw. der Ausgleichsrechnung wird eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt, die sich in drei größere Bereiche aufteilt:

i) Im ersten Bereich (Abschnitt 3) wird unter Berücksichtigung der Genauigkeiten

der Horizontalrichtungs-, Vertikalwinkel- und Distanzbeobachtungen des Tachymeters die Positionsgenauigkeit des UAV aus dem Einbild-Fall berechnet.

ii) Der zweite Bereich (Abschnitte 4 & 5) beschreibt den Genauigkeitseinfluss der gemessenen Bildkoordinaten, der Kamerakonstanten, der Horizontalrichtungs-, Vertikalwinkel- und Distanzbeobachtungen als auch der Kalibrierungsgenauigkeit auf die Position von Zielmarken am UAV sowohl für den Einbild-Fall über das Varianzfortpflanzungsgesetz als auch für den Mehrbild-Fall über die Ausgleichsrechnung mit integrierter Monte Carlo Simulation.

iii) Der dritte Bereich (Abschnitt 6) benutzt die Positionsgenauigkeiten der Marken im UAV-eigenen und im übergeordneten Koordinatensystem für die Bestimmung der Genauigkeiten der sechs Parameter der äußeren Orientierung.

Erste Ergebnisse bestätigen die Konzeptidee und belegen, dass über die Kombination aus terrestrischer Zielverfolgung mittels Tachymeter und photogrammetrischer Vermessung der Trägerplattform im Umkreis von ca. 400 m die Positionen des UAV theoretisch mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm und die Rotationsparameter mit bis zu 0.2° bestimmbar sind.

2 Idee zur terrestrischen Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV von einem Standpunkt

Die präzise Bestimmung der Position und die Beschreibung der 3D-Trajektorie eines UAV in Echtzeit können durch verschiedene geodätische Verfahren erreicht werden. Für Anwendungen im Millimeter- bis Zentimeter-Bereich für die absolute Lage- und Höhengenaugigkeit hat sich der Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern als geeignetes Verfahren erwiesen (EISENBEISS et al. 2009). KIRSCHNER & STEMPELHUBER (2008) untersuchten die Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern am Beispiel des Leica TPS 1200+ und erreichten bei ca. 50 m Zielweiten Ergebnisgenauigkeiten im Millimeterbereich. HENNES (2008) be-

schäftigte sich zudem mit der Bestimmung der kompletten äußeren Orientierung über eine rotierende Scheibe, auf der ein Reflektor exzentrisch montiert ist, dessen Position wiederum permanent, präzise und sehr schnell von einem zielverfolgenden Lasertracker bestimmt wird. Über die Kreisbahn des Reflektors lässt sich der Kreismittelpunkt (Messpunkt), aber auch die Lage der Kreisebene (Kreisnormale) bestimmen. Der Arbeitsradius dieses Systems wurde mit 24 m und $\pm 30^\circ$ angegeben. Die angegebenen Genauigkeiten liegen im μrad - bzw. μm -Bereich. Alternativ dazu existiert bereits das T-Probe und T-Cam-System (DOLD 2004), bei dem ein Kamerasystem mit einem Lasertracker kombiniert ist. Das Zielsystem (T-Probe-Taster) besteht aus einem Reflektor und mehreren LEDs, deren relative Positionen hochgenau bekannt sind. Der Lasertracker bestimmt die Position des Reflektors. Die Positionen der LEDs lassen sich dann über die Bildinformation der Kamera bestimmen. Über diese LEDs als homologe Punkte können anschließend die 6 Parameter der äußeren Orientierung des T-Probe bestimmt werden.

Das T-Probe- bzw. T-Cam-Grundprinzip wird in diesem Beitrag aufgegriffen und die theoretischen Genauigkeiten der Parameter der äußeren Orientierung für eine Tachymeter-Kamera-Kombination unter bestimmten Annahmen berechnet. Diese Konstellation hat den großen Vorteil, dass ein UAV kein zusätzliches Gewicht in Form von Sensoren aufnehmen muss und somit mehr Nutzlast für

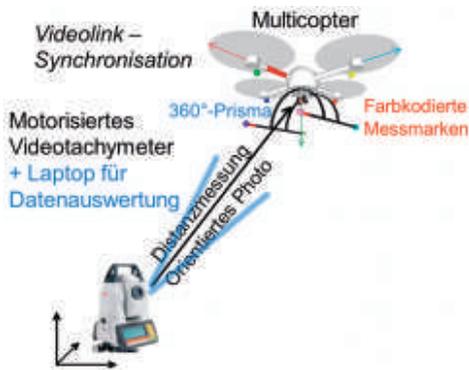


Abb. 1: Aktives Tracking mit Hilfe eines motorisierten Tachymeters und aufgesetzter Kamera – Einbild-Lösung.

die eigentlichen Messeinheiten zur Verfügung steht. Das Gewicht der Zielmarken ist sehr gering (Styroporbälle) und kann vernachlässigt werden.

Ein motorisiertes Tachymeter soll im Automatic Target Recognition-Modus (ATR) kontinuierlich die Position eines 360° -Prismas an der Unterseite des UAV (siehe Abb. 1) in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmen. Zusätzlich soll das Tachymeter um eine Kamera mit einer Festbrennweite erweitert werden. Einige Tachymetersysteme bieten bereits integrierte Kameras an.

Das Videobild, das durch die Zielverfolgung ständig das UAV abbildet, wird genutzt, um die Positionen der angebrachten und abgebildeten Marken am UAV zu berechnen (Einbildphotogrammetrie mit Nebenbedingungen nach LUHMANN et al. 2006). Die Positionen der Marken und des Reflektors (siehe Abb. 2) sollen durch Kalibrierung im UAV-eigenen Koordinatensystem hochgenau bekannt sein.

Liegen mindestens drei nicht kollineare Messmarkenpositionen vor, ist eine Bestimmung der 3D-Transformationsparameter möglich. Liegen mehr als drei Markenpositionen vor, erhält man durch die Überbestimmung eine Genauigkeitssteigerung. Je mehr Markenpositionen bekannt sind, umso genauer und zuverlässiger können die Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden.

Zusätzlich ist eine Genauigkeitssteigerung möglich, indem man auf weiteren koordinatenmäßig bekannten Standpunkten zielverfolgende Kameras nutzt, die auf sogenannten PAN/TILT-Units installiert sind (Mehrbildauswertung nach LUHMANN et al. 2006). Es

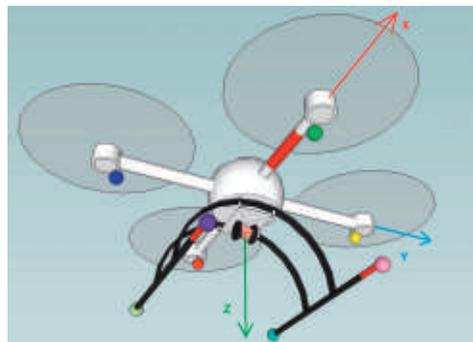


Abb. 2: UAV mit Reflektor und z.B. 8 farbigen Messmarken.

können so mehr Marken bzw. einige Marken redundant abgebildet und die Position der Marken unter günstigeren geometrischen Schnitten berechnet werden.

3 Bestimmung der UAV-Reflektorposition und deren Genauigkeit

3.1 Bestimmung der Position des UAV mit Hilfe des Tachymeters

Über eine Basisrichtung vom Tachymeterstandpunkt (ST1) zu einem zweiten Standpunkt (ST2) kann ein lokales Koordinatensystem sehr einfach erzeugt werden (Abb. 3), welches für die hier angestellten Berechnungen als übergeordnetes Objektkoordinatensystem fungiert. Der Koordinatenursprung sei zur Vereinfachung in den Tachymeterstandpunkt ST1 gelegt. Die Koordinaten von ST2 ergeben sich dann zu $X_{ST2} = '0'$, $Y_{ST2} = 'horizontaler Abstand zu ST1'$ und $Z_{ST2} = 'vertikaler Höhenunterschied zu ST1'$.

Der Richtungswinkel zwischen ST1 und ST2 (t_{ST1}^{ST2}) beträgt hierbei 90° . Aus den vorgegebenen Bedingungen und den Messelementen ergeben sich durch einfaches räumliches polares Anhängen (RESNIK & BILL 2009) die Gleichungen (2), (3) und (4) für die Berechnung der Koordinaten des UAV.

$$\alpha = H_{ST1}^{ST2} - H_{ST1}^{UAV} \tag{1}$$

$$Y_{UAV} = Y_{ST1} + \sin(t_{ST1}^{ST2} - \alpha) \cdot \sin(V_{ST1}^{UAV}) \cdot s_{ST1}^{UAV} \tag{2}$$

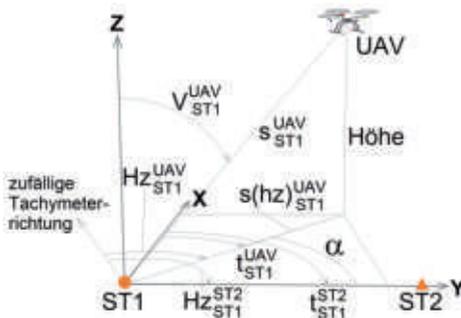


Abb. 3: Zusammenhang Tachymetermessung und Koordinatensystem.

$$X_{UAV} = X_{ST1} + \cos(t_{ST1}^{ST2} - \alpha) \cdot \sin(V_{ST1}^{UAV}) \cdot s_{ST1}^{UAV} \tag{3}$$

$$Z_{UAV} = Z_{ST1} + \cos(V_{ST1}^{UAV}) \cdot s_{ST1}^{UAV} \tag{4}$$

H_{ST1}^{ST2} und H_{ST1}^{UAV} sind die Horizontalrichtungen vom Standpunkt ST1 jeweils zu ST2 und zum Reflektor am UAV. V_{ST1}^{UAV} ist der Vertikalwinkel und s_{ST1}^{UAV} die Schrägstrecke von ST1 zum Reflektor am UAV.

3.2 Genauigkeitsbetrachtung für die UAV-Position mit dem Tachymeter

Mit (1) bis (4) kann die Genauigkeitsabschätzung für die kartesischen Koordinaten des UAV über das Varianzfortpflanzungsgesetz berechnet werden. Die Varianzen aller Beobachtungsgrößen stehen dabei in einer festgelegten Reihenfolge auf der Hauptdiagonalen in der Kovarianzmatrix C_{II} . Die Beobachtungen sollen zur Vereinfachung als unkorreliert angenommen werden. Es ergibt sich eine Diagonalmatrix. Alle partiellen Ableitungen von (2) bis (4) nach den Beobachtungen sind in der Funktionalmatrix F in entsprechender festgelegter Reihenfolge nach bekanntem Schema gesammelt.

Mit (5) lässt sich die Kovarianzmatrix der drei Unbekannten (C_{xx}) und damit deren Varianzen und Korrelation bestimmen.

$$C_{xx} = F \cdot C_{II} \cdot F^T \tag{5}$$

3.3 Ergebnisse zur Genauigkeit der UAV-Position mit dem Tachymeter

Für die Berechnung der Varianzen der UAV-Koordinaten wurden die obigen Formeln in Matlab programmiert. Es wurden mehrere Positionen und deren Varianzen im Raum um den Standpunkt ST1 (Abb. 4, Zentrum) berechnet. Die angenommenen Standardabweichungen für die Beobachtungen betragen 0.0009° für Horizontal- und Vertikalrichtungen und $1\text{ mm} + 1\text{ ppm}$ für die Streckenmessungen. Hierbei handelt es sich um Werte, die

von moderneren Tachymetern wie z. B. dem Trimble S8 (TRIMBLE 2011) oder dem Leica VIVA15 (LEICA 2011) erreicht werden. Um die Abbildungen nicht zu sehr mit Fehlerellipsoiden zu überhäufen, wird stattdessen der Gesamtpunktfehler (GPF) dargestellt, der sich nach (6) aus den Varianzen der bestimmten Position (X,Y,Z) berechnen lässt.

$$GPF = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \tag{6}$$

Abb. 4 zeigt die berechneten Gesamtpunktfehler der einzelnen Positionen farblich abgestuft um ST1. In einer Entfernung von beispielsweise 200 m erhält man in Abhängigkeit von der Steilheit der Visur einen Fehler zwischen 3 und 6 mm. Im Radius von 400 m treten Gesamtpunktfehler zwischen 8 mm und 1 cm auf.

Man erkennt, dass die Gesamtpunktfehler unabhängig von der horizontalen Entfernung sind. Anhand der vertikalen Schnitte kann man die Abhängigkeit von der Steilheit der Visur erkennen. Je steiler die Visur, desto geringer wird der Punktfehler. Dies liegt im funktionalem Modell begründet, da bei den Ableitungen der Sinus bzw. der Cosinus des Vertikalwinkels als Faktor Einfluss ausübt. Die Ergebnisse spiegeln das theoretische Fehlerverhalten nach Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes wider. Weitere Fehlerinflüsse wie Refraktion etc. wurden nicht berücksichtigt.

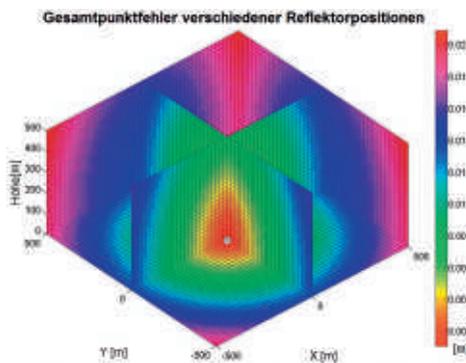


Abb. 4: Gesamtpunktfehler für verschiedene Reflektorpositionen.

4 Bestimmung der Position einer Marke am UAV und deren Genauigkeit

4.1 Bestimmung der Markenposition am UAV mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

Das synchronisiert mitgeführte Videobild liefert in Kombination mit den Tachymetermessungen die Positionen der einzelnen Marken im Raum. Folgende Bedingungen sollen zur Vereinfachung der Genauigkeitsberechnungen während der Bildaufnahme vorliegen.

1. Die Ziellinie zum Reflektor am UAV muss senkrecht zur Bildebene liegen.
2. Die X-Achse des Bildkoordinatensystems sollte parallel zur Kippachse des Tachymeters liegen.
3. Das Projektionszentrum der Kamera sollte im Achsschnittpunkt des Tachymeters liegen.

Abb. 5 verdeutlicht den mathematischen Zusammenhang zwischen Tachymetermessung und Bildmessung. Die Strecke s_{ST1}^{UAV} wird mit dem Tachymeter zum Reflektor am UAV bestimmt. Die konstante Strecke s_{UAV}^{Marke} wird über Kalibrierung bestimmt. Eine solche Kalibrierung könnte photogrammetrisch mit Genauigkeiten im Submillimeterbereich erfolgen. Um die Entfernung zwischen Projektionszentrum und Marke (s_{ST1}^{Marke}) zu berechnen, wird der Winkel ϵ mit Hilfe der Bildkoordinaten der Marke und der Kamerakonstanten bestimmt.

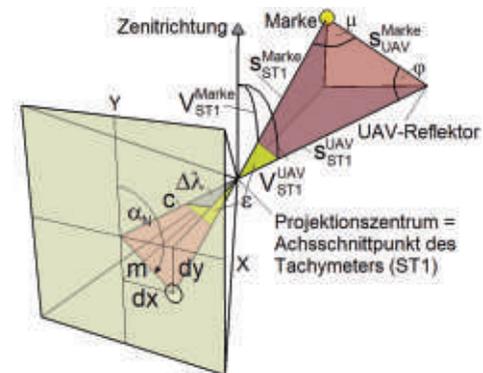


Abb. 5: Mathematische Beziehungen zwischen Tachymeter- und Bildmessung.

Der Winkel ε kann eine beliebige Lage im Raum annehmen und wird daher in einen Vertikal- und Horizontalwinkelanteil zerlegt.

Da die Richtungsmessung am Tachymeter ähnlich der Längen- und Breitenmessung an einer Kugel ist (Achsschnittpunkt des Tachymeters im Zentrum der Kugel), gibt es bei der Berechnung der horizontalen und vertikalen Richtungskomponente bei steileren Visuren sphärische Einflüsse, die berücksichtigt werden müssen, um eine mathematisch korrekte Grundlage für das Varianzfortpflanzungsgesetz zu erhalten.

JURETZKO (2005) beschreibt den exakten geometrischen Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Theodolitrichtungen. Er nimmt dabei Bezug auf die schiefachsige gnomonische Abbildung. Dabei wird die Richtungsmessung des Tachymeters mit der Längen- und Breitenkreismessung an einer Kugel gleichgesetzt. Die Stehachse (Z-Achse) zeigt in Zenitrichtung. Die X- und Y-Achse liegen in der Horizontalebene und stehen rechtwinklig zueinander (Abb. 6).

Da die Zielachse des Videotachymeters für den betrachteten Fall senkrecht durch den Bildhauptpunkt der Kamerabildebene geht, kann man sich für die Bildebene eine tangentielle Ebene an der Kugeloberfläche mit dem Radius der Kamerakonstanten vorstellen. Der Schnittpunkt des Lichtstrahls vom Objekt durch den Kugelmittelpunkt und die Bildebene ergibt die Bildkoordinaten (gnomonische Beziehung).

Die Formeln von JURETZKO (2005) beschreiben den rechentechnischen Weg von den

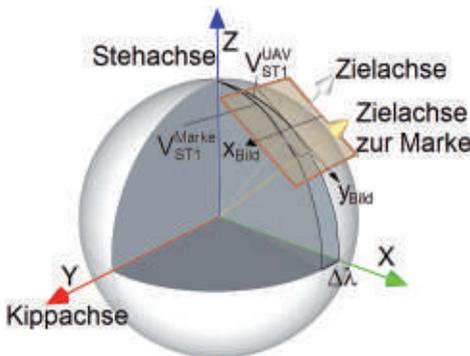


Abb. 6: Prinzip der gnomonischen Projektion.

Tachymeterbeobachtungen zu den Bildkoordinaten, beispielsweise einer Marke. Zur Bestimmung der Tachymeterrichtungen aus den Bildkoordinaten und den Tachymeterbeobachtungen zum UAV-Reflektor wird dieser Rechenweg invertiert.

Gemessen werden die Bildkoordinaten dx und dy sowie die Horizontalrichtung, der Vertikalwinkel und die Schrägstrecke zum UAV-Reflektor. Die Kamerakonstante c und der Abstand vom Reflektor zur Marke seien durch Kalibrierung bekannt. Die Fallunterscheidung, wo sich die Marke auf dem Zielstrahl befindet (weiter vorne oder weiter hinten), soll gelöst vorliegen. Diese Mehrdeutigkeit kann z. B. durch kodierte Marken oder unterschiedliche Farbe an Vor- und Rückseite gelöst werden.

Die Formeln von JURETZKO (2005) beziehen sich auf ein Koordinatensystem, bei dem sich der Nordpol bei 90° und die Äquatorebene (bzw. Horizontalebene) bei 0° befinden. Daher muss vorher der Vertikalwinkel im Tachymetersystem zum UAV-Reflektor umgerechnet werden (7).

$$\varphi_{ST1}^{UAV} = \frac{\Pi}{2} - \nu_{ST1}^{UAV} \tag{7}$$

In Abb. 5 sind in der Kamerabildebene die polaren und die kartesischen Bildkoordinaten der abgebildeten Marke dargestellt. Der Richtungswinkel α_N sowie die Strecke m lassen sich aus (8) und (9) herleiten.

$$\alpha_N = \arctan\left(\frac{dx}{dy}\right) + \text{Quadrant} \tag{8}$$

$$m = \sqrt{dx^2 + dy^2} \tag{9}$$

Aus m und c lässt sich dann der Winkel ε berechnen.

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{m}{c}\right) \tag{10}$$

Hier ist eine Quadrantenabfrage nicht notwendig, da der Abstand m und die Kamerakonstante c immer positiv sind. Mit (11) lässt sich aus α_N , φ_{ST1}^{UAV} und ε nun φ_{ST1}^{Marke} berechnen.

$$\varphi_{ST1}^{Marke} = \arcsin(\cos(\alpha_N) \cdot \cos(\varphi_{ST1}^{UAV}) \cdot \sin(\varepsilon) + \sin(\varphi_{ST1}^{UAV}) \cdot \cos(\varepsilon)) \quad (11)$$

Da φ_{ST1}^{Marke} im Kugelsystem berechnet wurde, muss eine Rückumformung ins Tachymetersystem durchgeführt werden (12).

$$V_{ST1}^{Marke} = \frac{\Pi}{2} - \varphi_{ST1}^{Marke} \quad (12)$$

Aus α_N , φ_{ST1}^{Marke} und ε lässt sich nun $\Delta\lambda$ bestimmen (13).

$$\Delta\lambda = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_N) \cdot \sin(\varepsilon)}{\cos(\varphi_{ST1}^{Marke})}\right) \quad (13)$$

Um die Horizontalrichtung zur Marke bzgl. der Horizontalrichtung zum UAV-Reflektor zu bekommen, muss der Winkel aus (13) addiert werden (14).

$$Hz_{ST1}^{Marke} = Hz_{ST1}^{UAV} + \Delta\lambda \quad (14)$$

Abb. 5 veranschaulicht zudem die sich anschließende Berechnung der Strecke s_{ST1}^{Marke} .

Über den Sinussatz lässt sich aus dem Winkel ε und den Strecken s_{ST1}^{UAV} und s_{UAV}^{Marke} der Winkel μ berechnen (15).

$$\mu = \arcsin\left(\frac{s_{ST1}^{UAV}}{s_{UAV}^{Marke}} \cdot \sin(\varepsilon)\right) \quad (15)$$

Zu beachten ist, dass die Berechnung des Winkels μ für diese Konstellation der Eingangswerte nicht eindeutig ist. Die Funktion „arcsin“ ist zwischen den Werten -1 und 1 definiert, liefert also nur Werte zwischen -90° und 90° . Liegt eine Zielmarke im Bereich zwischen Projektionszentrum und UAV-Reflektor, so wird μ größer als 90° . In diesem Fall muss der Komplementärwinkel benutzt werden.

Der Winkel φ lässt sich über die Innenwinkelsumme im Dreieck bestimmen (16).

$$\varphi = \Pi - (\varepsilon + \mu) \quad (16)$$

Die Strecke zwischen dem Tachymeter (Projektionszentrum) und der Marke kann jetzt über den Kosinussatz bestimmt werden (17).

$$s_{ST1}^{Marke} = \sqrt{\left(s_{ST1}^{UAV}\right)^2 + \left(s_{UAV}^{Marke}\right)^2 - 2s_{ST1}^{UAV} s_{UAV}^{Marke} \cos(\varphi)} \quad (17)$$

Die Koordinaten der Marke ergeben sich dann aus den Formeln des räumlichen polaren Anhängens.

$$\beta = t_{ST1}^{ST2} - Hz_{ST1}^{ST2} + Hz_{ST1}^{Marke} \quad (18)$$

$$Y_{Marke} = Y_{ST1} + \sin(\beta) \cdot \sin(V_{ST1}^{Marke}) \cdot s_{ST1}^{Marke} \quad (19)$$

$$X_{Marke} = X_{ST1} + \cos(\beta) \cdot \sin(V_{ST1}^{Marke}) \cdot s_{ST1}^{Marke} \quad (20)$$

$$Z_{Marke} = Z_{ST1} + \cos(V_{ST1}^{Marke}) \cdot s_{ST1}^{Marke} \quad (21)$$

4.2 Genauigkeitsbetrachtung für die Markenpositionen mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

Die Gleichungen (7) bis (21) können im Varianzfortpflanzungsgesetz angewendet werden, um die Genauigkeiten der Markenpositionen zu bestimmen. Wegen der Komplexität und der Verästelungen im Rechenweg bietet sich die verschachtelte Varianzfortpflanzung an, bei der die funktionalen Zusammenhänge auf mehrere Funktionalmatrizen verteilt werden.

Die Beobachtungen sind die Bildkoordinaten dx und dy sowie die Kamerakonstante c , die Horizontalrichtung Hz_{ST1}^{UAV} sowie Hz_{ST1}^{ST2} , der Vertikalwinkel V_{ST1}^{UAV} und die Strecken s_{ST1}^{UAV} sowie s_{ST1}^{Marke} . Zur Vereinfachung der Berechnungen sollen alle Beobachtungen untereinander als unkorreliert angenommen werden, was bei der Trennung der Beobachtungen in Tachymeter- bzw. Kameramesswerte durchaus gerechtfertigt ist. Die Varianzen stehen auf der Hauptdiagonalen in der Kovarianzmatrix C_{II} in festgehaltener Reihenfolge. Die verkettete Varianzfortpflanzung wird in 6 Unterfunktionalmatrizen aufgedgliedert (22).

$$\begin{matrix} dx \\ dy \\ c \\ S_{ST1}^{UAV} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \\ HZ_{ST1}^{UAV} \\ V_{ST1}^{UAV} \end{matrix} \rightarrow F_1 \rightarrow \begin{matrix} \varphi_{ST1}^{UAV} \\ \alpha_N \\ m \\ c \\ S_{ST1}^{UAV} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \\ HZ_{ST1}^{UAV} \end{matrix} \rightarrow F_2 \rightarrow \begin{matrix} \epsilon \\ \varphi_{ST1}^{UAV} \\ \alpha_N \\ S_{ST1}^{UAV} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \\ HZ_{ST1}^{UAV} \end{matrix} \rightarrow F_3 \rightarrow \begin{matrix} \mu \\ \varphi_{ST1}^{Marke} \\ \epsilon \\ \alpha_N \\ S_{ST1}^{UAV} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \\ HZ_{ST1}^{UAV} \end{matrix} \rightarrow F_4 \rightarrow \begin{matrix} \varphi \\ \Delta\lambda \\ V_{ST1}^{Marke} \\ S_{ST1}^{UAV} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \\ HZ_{ST1}^{UAV} \end{matrix} \rightarrow F_5 \rightarrow \begin{matrix} HZ_{ST1}^{Marke} \\ S_{ST1}^{Marke} \\ V_{ST1}^{Marke} \\ HZ_{ST1}^{ST2} \end{matrix} \rightarrow F_6 \rightarrow \begin{matrix} Y_{Marke} \\ X_{Marke} \\ Z_{Marke} \end{matrix} \quad (22)$$

In F_1 sind (7), (8), (9), in F_2 (10), in F_3 (11), (15), in F_4 (12), (13), (16), in F_5 (14), (17) und in F_6 (19), (20) als Ableitungen nach den Beobachtungen in entsprechender Reihenfolge enthalten. Später benötigte Beobachtungsvarianzen werden in den Funktionalmatrizen durchgereicht. Die Kovarianzmatrix der Koordinaten der Marke berechnet sich nach (23).

$$C_{xx(Marke)} = F_6 \cdot F_5 \cdot F_4 \cdot F_3 \cdot F_2 \cdot F_1 \cdot C_{11} \cdot F_1^T \cdot F_2^T \cdot F_3^T \cdot F_4^T \cdot F_5^T \cdot F_6^T \quad (23)$$

4.3 Ergebnisse zur Genauigkeit der Markenpositionen mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

4.3.1 Verhalten des Gesamtpunktfehlers

Die jeweils zu bestimmende Marke, der Reflektor und das Tachymeter spannen im Raum ein Dreieck auf. Der Reflektor sollte im Schwerpunkt des UAV montiert sein. Um schleifende Schnitte (spitzwinklige Dreiecke) zu vermeiden, sollte die Marke so weit wie möglich vom Reflektor entfernt sein. Für die Genauigkeitsbetrachtungen wurden für verschiedene Markenpositionen mit dem maximal möglichen Abstand rund um den Reflektor die Gesamtpunktfehler nach (5) berechnet und farbcodiert dargestellt. Der maximale Abstand zwischen Marke und Reflektor soll in Anlehnung an die Ausmaße einer MD4-1000 von der Firma microdrones 50 cm betragen.

Abb. 7 zeigt ein charakteristisches Verhalten des Gesamtpunktfehlers rund um den Reflektor. Man erkennt, dass der Gesamtpunktfehler

stark von der Aufnahmegeometrie abhängt und sich extrem an den tangentialen Schnittpunkten des Sehstrahls an der Kugeloberfläche auswirkt (dunkelrot, Fehler größer 20 cm). Grund ist die ungünstige Schnittgeometrie. Die Entfernungen zwischen Tachymeter und Reflektor sowie zwischen Reflektor und Marke sind bekannt, ebenso der Winkel ϵ . Für den Fall, dass der Winkel an der Marke 90° beträgt, entsteht ein schleifender Schnitt. Das bedeutet, wenn ϵ sich nur gering verändert, verändert sich die Position der Marke und damit die Entfernung zwischen ST1 und Marke sehr stark. Gut zu erkennen ist auch, dass der größte Teil der Markenpositionen dunkelgrün bis hellgrün ist und damit Punktfehler unter 1 cm für diese Konstellation dominieren. Der tatsächliche Punktfehler einer Marke hängt also sehr stark von seiner Position in Relation zum Reflektor und dem Tachymeter ab. Wichtig ist, dass sich genügend Marken in günstigen Schnittbereichen befinden. Da sich das Genauigkeitsverhalten ringförmig auf einer Kugeloberfläche äußert, kann man schon mit relativ wenigen Punkten die Genauigkeitsgrenzen approximieren.

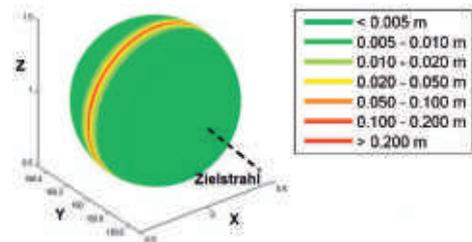


Abb. 7: Gesamtpunktfehler der Markenposition rund um den Reflektor.

4.3.2 Berechnungen zum Einfluss von einzelnen Beobachtungen und deren Genauigkeiten

Tab. 1 gibt einen Überblick über den Einfluss der einzelnen Beobachtungen bei Verschlechterung um eine Zehnerpotenz. Da davon ausgegangen werden kann, dass sich der Gesamtpunktfehler mit zunehmender Entfernung verschlechtert, wird das Fehlerverhalten in maximaler Weite vom Beobachter bestimmt. Nach § 16 Abs. 7 der Luftverkehrsordnung (LUFTVO 2010) ergibt sich für Deutschland u. a., dass auf Sicht (ohne Hilfsmittel) und maximal 1.000 Fuss (ca. 300 m) hoch geflogen werden darf. Das UAV soll daher für die Berechnungen als 250 m in X-, Y- und Z-Richtung entfernt (Abstand demnach 433 m) angenommen werden. Auf diese Entfernung ist beispielsweise eine MD4-1000 von microdrones mit ca. 1 m Durchmesser mit bloßem Auge sehr schwer zu erkennen. Die Entfernung zwischen Tachymeter und UAV-Reflektor stellt also bezüglich der Sichtbarkeit

des UAV den Extremfall dar. Die angegebenen Referenzgenauigkeiten entsprechen den technischen Daten heutiger Tachymeter. Die Genauigkeiten der Bildkoordinaten beziehen sich auf die automatische Erkennbarkeit von kreis- bzw. ellipsenförmigen Objekten. LUHMANN (2006) untersuchte den Zusammenhang zwischen Flächengröße (Pixelanzahl) und Genauigkeit des Mittelpunkts nach Schwerpunktmethod, Kleinste-Quadrate-Methode und Ellipsen-Operator. Die Kamera ist so zu wählen, dass das Zielobjekt (Messmarke) mit einem Durchmesser von mindestens 5 Pixeln abgebildet wird. LUHMANN (2006) gibt bei 5 Pixeln eine empirisch ermittelte Genauigkeit von ca. 0.014 Pixeln an. Da im Einsatz später keine Laborbedingungen vorherrschen, wird die Pixelgenauigkeit von 0.1 Pixel angenommen. Bei einer Pixelgröße von 5–7 μm (heutige digitale Kamerasensoren) würde somit eine Genauigkeit von 0.5–0.7 μm resultieren. Daher sind die angenommenen Genauigkeiten der Bildkoordinaten der Messmarke als realistisch anzunehmen.

Tab. 1: Einfluss der Genauigkeit der Bildkoordinaten, der Kamerakonstanten und der Tachymeterbeobachtungen $s_{ST1}^{UAV} = \text{ca. } 433 \text{ m}$, $\text{Hz}_{ST1}^{UAV} = \text{konstant}$, $V_{ST1}^{UAV} = 35,1^\circ$.

Bezeichnung	Referenzwerte	Bildkoordinaten & Kamera-konstante	Distanzmessung	Winkelmessung
$\sigma_{dx} (\mu\text{m})$	1	10	1	1
$\sigma_{dy} (\mu\text{m})$	1	10	1	1
$\sigma_c (\mu\text{m})$	10	100	10	10
$\sigma_s (\text{m})$	0.001	0.001	0.01	0.001
ppm (m)	0.001	0.001	0.01	0.001
$\sigma_{\text{eMarke}}^{UAV} (\text{m})$	0.001	0.001	0.001	0.001
$\sigma_{\text{Hz}_{ST1}} (\text{°})$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
$\sigma_{\text{Hz}_{ST1}^{UAV}} (\text{°})$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
$\sigma_{V_{ST1}^{UAV}} (\text{°})$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
< 0.005 m (%)	0	0	0	0
0.005 – 0.010 m (%)	0	0	0	0
0.010 – 0.020 m (%)	85.93	0	74.20	0
0.020 – 0.050 m (%)	9.18	50.55	20.71	0
0.050 – 0.100 m (%)	2.48	27.12	2.67	0
0.100 – 0.200 m (%)	1.20	11.42	1.21	98.60
> 0.200 m (%)	1.18	10.91	1.19	1.39

Die Innere Orientierung einschließlich der Kamerakonstante ist vielen variablen Einflüssen, z. B. Temperatur, Luftdruck etc., unterworfen (WASMEIER 2009). Daher ist eine einfache Kalibrierung vor dem tatsächlichen Einsatz erforderlich. Als Ergebnis der Kalibrierung ist eine Genauigkeit der Kamerakonstante von $\pm 10 \mu\text{m}$ realistisch. Das UAV hat bis zu 30 min Flugzeit. Lediglich für diesen Zeitraum soll die automatische Zielverfolgung inklusive Bildmessung stattfinden.

In Tab. 1 sieht man in den ersten 9 Zeilen die angenommenen Genauigkeiten der Beobachtungen. Der Vertikalwinkel beträgt 35.1° und die Horizontalrichtung ist konstant. Mit sehr guten Beobachtungsgenauigkeiten (Spalte 2 Referenzwerte) ergeben sich keine Punktgauigkeiten unter 1 cm. Jedoch befinden sich ca. 86 % der Kugeloberfläche (gemäß Abb. 7) im Bereich von 1 bis 2 cm (Gelb-Grün) und ca. 9 % im Bereich von 2 bis 5 cm (Gelb).

In Spalte 3 wird der Genauigkeitsbereich der Bildkoordinaten als auch der Kamerakonstanten um eine Zehner-Potenz verschlechtert. Das reicht aus, dass keine Gesamtpunktfehler unter 2 cm vorhanden sind. Ca. 50 % der Kugeloberfläche liegen im Bereich von 2 bis 5 cm (Gelb). Ca. 27 % liegen im Bereich von 5 bis 10 cm. Der Rest ist schlechter als 10 cm.

In der Spalte 4 werden die Streckengenauigkeit und der streckenmäßige Fehleranteil verzehnfacht. Ca. 74 % der Kugeloberfläche liegen im Bereich von 1 bis 2 cm. Im Vergleich mit Spalte 2 hat sich der Bereich von 2 bis 5 cm jedoch von ca. 10 % auf ca. 20 % gut verdoppelt.

In Spalte 5 wurden die Genauigkeiten der Winkelmessung sowohl horizontal als auch vertikal verzehnfacht. Durch diese Verschlechterung sind keine Punktfehler unter 10 cm mehr vorhanden. Ca. 98 % der Kugeloberfläche weisen Punktfehler innerhalb von 10 bis 20 cm auf. Dieser Fehlereinfluss erscheint sehr stark, ist aber eine Folge der großen Entfernung zwischen Tachymeter und UAV.

Die Genauigkeiten der Winkelmessung (Spalte 5) und die Genauigkeiten der Bildkoordinaten und der Kamerakonstanten (Spalte 3) haben einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Markenpositionen. Der Fehlereinfluss der Streckenmessung hat im Vergleich dazu eher mäßigen Einfluss.

4.3.3 Berechnungen in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie

Nachfolgend soll nun untersucht werden, welchen Einfluss die Aufnahmegeometrie auf die Genauigkeit der Markenpositionen ausübt. Dabei wurde von folgenden Genauigkeiten ausgegangen: $\sigma_{dx} = \sigma_{dy} = 1 \mu\text{m}$, $\sigma_c = 10 \mu\text{m}$, $\sigma_s = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, $\sigma_{S_{\text{UAV}}^{\text{Marke}}} = 0.001 \text{ m}$, $\sigma_{\text{H}_{\text{ZST1}}^{\text{UAV}}} = \sigma_{\text{V}_{\text{ST1}}^{\text{UAV}}} = 0.0009^\circ$. Die Entfernung zwischen Tachymeter und UAV-Reflektor soll nun 100 m betragen, damit Gesamtpunktfehler unter 5 mm erreicht werden.

Abb. 8a zeigt die Ergebnisse des Genauigkeitsverhaltens bei steiler werdenden Visuren. Im Diagramm sind prozentual die Anteile der Kugeloberfläche, die den jeweiligen Genauigkeiten entsprechen, für Vertikalwinkel zwischen 25° und 90° gegenübergestellt. Man erkennt, dass mit flacher werdender Visur der prozentuale Anteil des Genauigkeitsbereichs bis 5 mm fällt und der prozentuale Anteil für den Genauigkeitsbereich zwischen 5 mm bis 1 cm gleichzeitig ansteigt. Das korreliert mit den Ergebnissen der Genauigkeit der UAV-Position beim Tracken.

Abb. 8b zeigt die Untersuchungsergebnisse für das Genauigkeitsverhalten für verschiedene Horizontalrichtungen. Das Genauigkeitsverhalten ist konstant und somit unabhängig von Horizontalrichtungen.

In Abb. 8c wird die Abhängigkeit von der Entfernung gezeigt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich mit größer werdender Distanz die Positionsgenauigkeit der Marke verschlechtert. Bei 300 m sind lediglich ca. 2/3 der Kugeloberfläche im Bereich von 5 mm bis 1 cm. Bei 350 m schwindet dieser Anteil auf ca. 9 %. Der Anteil der Kugeloberfläche im Bereich von 1 bis 2 cm liegt ab 350 m bis 500 m jedoch immer noch im Bereich zwischen 80 % und 75 %.

In Abb. 8d sind die Ergebnisse für etwas schlechtere Genauigkeitsvorgaben aufgeführt. σ_{dx} , σ_{dy} und σ_c liegen hier bei $10 \mu\text{m}$. Die Streckenmessung weist eine Genauigkeit von $\sigma_s = 5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm}$, $\sigma_{S_{\text{UAV}}^{\text{Marke}}} = 0.005 \text{ m}$ auf und die Vertikal- ($\sigma_{\text{V}_{\text{ST1}}^{\text{UAV}}}$) als auch die Horizontalwinkelmessung ($\sigma_{\text{H}_{\text{ZST2}}^{\text{UAV}}}$, $\sigma_{\text{H}_{\text{ZST1}}^{\text{UAV}}}$) sollen 0.0045° genau sein.

Das Gesamtfehlerverhalten verschlechtert sich deutlich. Bis zu einer Entfernung

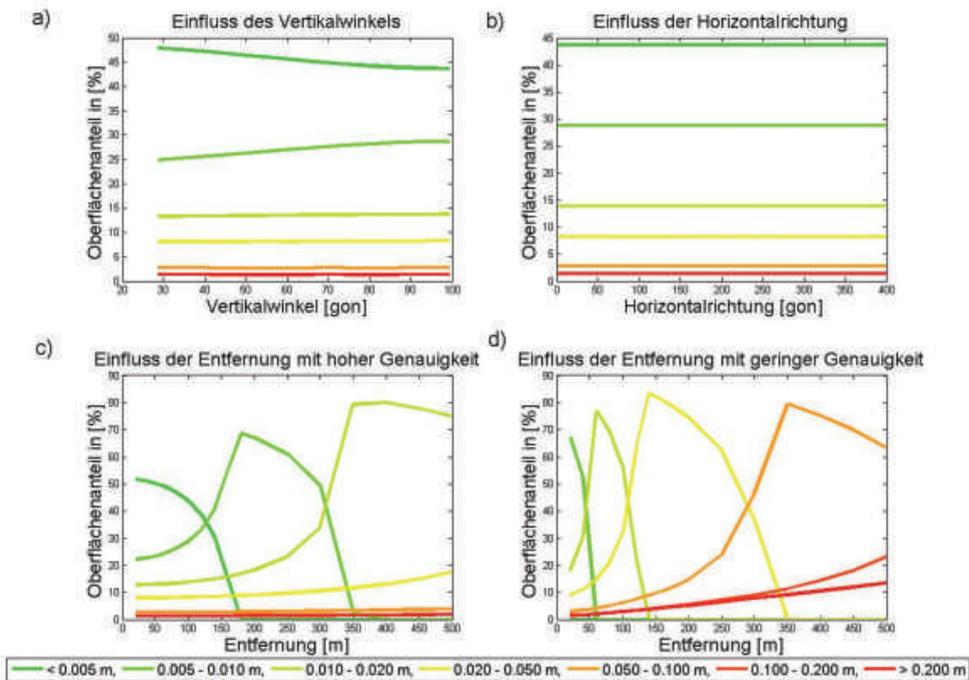


Abb. 8: Genauigkeitseinfluss der Aufnahmegeometrie.

von 40 m liegen Punktfehler zu ca. 51 % im Genauigkeitsbereich bis 1 cm. Bis zu dieser Entfernung wären diese Messgenauigkeiten durchaus vertretbar. Bei 120 m beträgt der Genauigkeitsbereich bis 2 cm nur noch 23 %. Bei 300 m sind 36 % der Kugeloberfläche im Genauigkeitsbereich zwischen 2 und 5 cm.

Die Berechnungen zeigen, dass für ausreichend gute Ergebnisse sehr genaue Messinstrumente verwendet werden müssen, wie sie in der Ingenieurgeodäsie bereits Anwendung finden. Eine Kamerakalibrierung unmittelbar vor dem Messeinsatz sollte die innere Orientierung der Kameras ausreichend gut bestimmen.

5 Ansatz mittels Mehrbild-Photogrammetrie (Stereo-Lösung)

5.1 Bestimmung der Markenposition am UAV mit Hilfe der Mehrbild-Photogrammetrie

Zusätzlich zu der bisher beschriebenen Systemkonfiguration sollen eine oder mehrere motorisierte Referenzkameras am Ende von gemessenen Basen zum Einsatz kommen (Abb. 9). Mit diesem Ansatz verbindet sich eine gewisse Redundanz, was ein größeres Maß an Zuverlässigkeit gewährleistet und das Tracking mit hoher Genauigkeit auch unter ungünstigen geometrischen Konfigurationen (schleifende Schnitte, gefährlicher Kreis) möglich macht.

In den weiteren Untersuchungen wird das Fehlerverhalten der Markenposition unter Einbeziehung eines zweiten Kamerastandpunktes (Stereofall) berechnet. Die Messanordnung sieht hierbei vor, dass von einem Standpunkt (ST1) mit einem motorisierten Videotachyme-

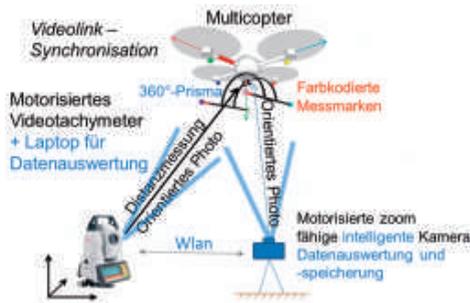


Abb. 9: Aktives Tracking mit Referenzkamera (Stereo-Lösung).

ter das UAV getrackt wird. Zeitgleich sollen über die Kamera am Tachymeter die Bildkoordinaten der Zielmarken am UAV bestimmt werden (analog also zum bisher behandelten Einbild-Fall). Zusätzlich wird nun eine Kamera auf einem zweiten Standpunkt (ST2), die über eine Pan-Tilt-Unit horizontal und vertikal schwenkbar ist, in einem bestimmten Abstand zum ersten Standpunkt so positioniert, dass sich ein annähernd gleichseitiges horizontales Dreieck zwischen ST1, ST2 und dem UAV aufspannt. Das Tachymeter misst die Position ST2 ein. Zudem sollte das UAV formatfüllend abgebildet werden, da dadurch die Marken besser detektiert werden können. Die Pan-Tilt-Unit sorgt in Verbindung mit der Kamera für die Zielverfolgung des UAV, so dass der Reflektor am UAV immer im Bildkoordinatenursprung des Kamerabildes bleibt. Die Pan-Tilt-Units verfügen in der Regel über keine Winkelmessseinheiten. Lediglich anhand der Drehrate und der Schrittgenauigkeit der Servomotoren kann man grob die Winkeleinstellungen nachvollziehen. Jedoch können über die Kamerapositionen und die Position des UAV die äußeren Orientierungen der Kameras bestimmt werden, wenn das UAV abgebildet wird. Das Tachymeter wird bei dieser Messkonfiguration benötigt. Die Bildkoordinaten der Marken können vom Kamerastandpunkt aus in Horizontal- und Vertikalwinkel zwischen Reflektor und Marke (Ablagen) umgerechnet werden. Da die äußere Orientierung der Bilder auf der getrackten Position des UAV basieren, findet die Genauigkeitssteigerung nur bei der Bestimmung der Markenpositionen in Relation zueinander und zum Reflektor statt. Somit lassen sich die Drehwinkel

der äußeren Orientierung genauer ermitteln, die eigentliche UAV-Position jedoch nicht.

Da es sich bei den Ablagen um Horizontal- und Vertikalwinkel handelt, kann mit den Beobachtungen von ST1 und dem Vorwissen über die Distanz zwischen UAV-Reflektor und Marke eine 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet werden. Die Koordinaten von ST1 und die X-Koordinate von ST2 bilden das fehlerfreie geodätische Datum. Als Beobachtungsgleichungen gehen die klassischen mathematischen Beziehungen zwischen den Standpunkt- bzw. Zielpunktkoordinaten und den Beobachtungsgrößen (Horizontalrichtung, Horizontalwinkel, Vertikalwinkel, Vertikalwinkeldifferenzen, Strecken) ein.

Die Netzausgleichungsberechnungen unter Zwang basieren für die nachfolgenden Beispielrechnungen auf dem vermittelnden (iterativen) Ansatz mit Näherungswerten. Alle Matrizen und Beobachtungsvektoren orientieren sich in ihrem Aufbau an einer festen Beobachtungsreihenfolge. Die Varianzen der Beobachtungstypen gehen in die Kovarianzmatrix (C_{II}) der Beobachtungen und den mittleren Gewichtseinheitsfehler $m_{0,APRIORI}$ als Gewichtsmatrix (P) ein (24).

$$P = \frac{1}{m_{0,APRIORI}^2} \cdot C_{II} \quad (24)$$

In der Funktionalmatrix A stehen in entsprechender Reihenfolge die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen. Die Verbesserungen der Näherungswerte bzw. der Unbekannten berechnen sich nach (25) und (26).

$$dl = I_{gem} - I_{ger} \quad (25)$$

$$dx = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P dl \quad (26)$$

5.2 Genauigkeitsberechnungen für die Markenpositionen mit Hilfe der Mehrbild-Photogrammetrie

Die Markenpositionen werden mit Hilfe der 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet. Um Aussagen über die theoretische Genauigkeit der Unbekannten zu bekommen,

erfolgen Simulationen mit verschiedenen Beobachtungssätzen in Anlehnung an die Monte Carlo Methode. Hier werden die Beobachtungen variabel innerhalb ihres Genauigkeitsbereiches zufällig verfälscht, so dass plausible verfälschte Beobachtungssätze vorliegen. Mit den verfälschten Beobachtungssätzen wird jeweils eine 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet. Die Koordinaten von ST1 und die X-Koordinate von ST2 bilden das fehlerfreie geodätische Datum. Die Simulation wird 10.000 mal wiederholt, da bei höherer Wiederholungsrate keine signifikanten Änderungen im Fehlerverhalten auftraten. Die berechneten Positionen des UAV, der Marke sowie die Y- und Z-Koordinate von ST2 werden gespeichert und 3-dimensional als Punktwolke verarbeitet. Hieraus können die Standardabweichungen, Mittelwert bzw. maximaler und minimaler Wert ermittelt werden.

5.3 Visuelle Gegenüberstellung der Einbild- und der Zweibild-Methode

Um einen Eindruck über die Genauigkeitssteigerung der Mehrbild-Methode zu bekommen, sollen hier exemplarisch die Genauigkeitsberechnungen der Einbild- und der Mehrbild-Methode visuell verglichen werden. Dazu wurden wieder rund um den UAV-Schwer-

punkt (Reflektor) im Abstand von 50 cm und im Intervall von einem Grad Abstand sowohl horizontal als auch vertikal Markenpunkte berechnet. Es ergeben sich eingefärbte Kugeloberflächen. Die Bedingungen des Einbild-Falls wurden für den Mehrbild-Fall lediglich um einen zweiten Kamerastandpunkt erweitert. Die Beobachtungsgenauigkeiten sind identisch. Konkrete Werte sollen hier nachgeordnet sein und werden sicherlich für verschiedene Szenarien auch unterschiedliche Ergebnisse produzieren.

Abb. 10a zeigt das Genauigkeitsverhalten für den Einbild-Fall über das Varianzfortpflanzungsgesetz mit typischem Ringmuster. Abb. 10b zeigt hingegen die Ergebnisse der simulierten 3D-Netzausgleichung für den Zweibild-Fall. Für jeden einzelnen Oberflächenpunkt wurden 10.000 Beobachtungssätze simuliert und über den iterativen Ausgleichsansatz mit Näherungswerten berechnet. Bei genauerer Betrachtung kann man auch noch einen Ring ganz schwach gelb durchschimmern sehen. Die Punktgenauigkeiten schwanken beim Zweibild-Fall jedoch kaum und liegen für diesen Fall bei einer Grenze von 1 cm. Man erkennt gut, dass eine Genauigkeitssteigerung stattgefunden hat, da in Abb. 10a noch Ringmuster bis zur Farbe Rot vorhanden sind, die in Abb. 10b deutlich abgemildert wurden.

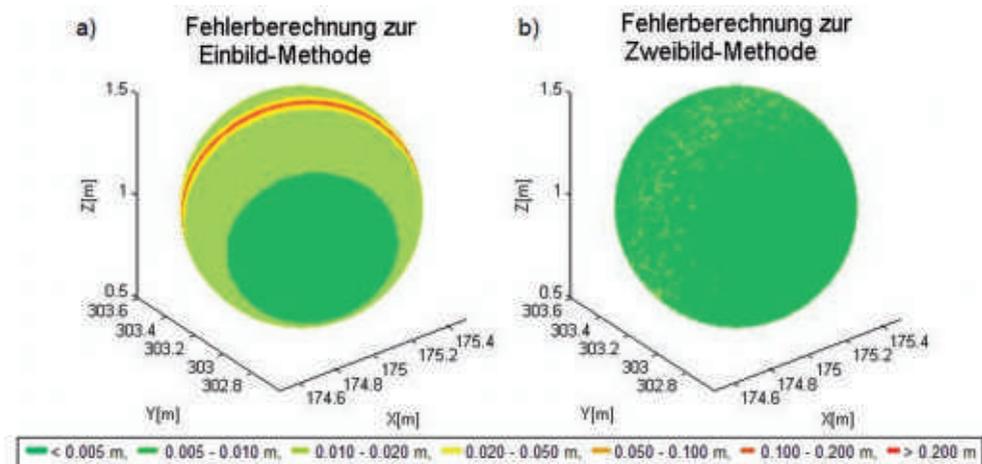


Abb. 10: Gegenüberstellung Einbild- und Zweibild-Methode.

6 Zur Bestimmung der äußeren Orientierung

6.1 Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung mit Hilfe der Markenpositionen

Mindestens 3 Marken am UAV sollten im UAV-eigenen und im übergeordneten Koordinatensystem bekannt sein, um die 6 3D-Transformationsparameter zwischen den beiden Systemen zu bestimmen (LUHMANN 2009). Die Methode der kleinsten Quadrate berechnet hierbei die besten Schätzwerte für die unbekannt Parameter. Als funktionales Modell eignet sich eine 6 –Parametertransformation. Das UAV-eigene Koordinatensystem bildet das Startsystem und das übergeordnete Koordinatensystem das Zielsystem ab. Nach NIEMEIER (2002) werden die Koordinaten im Zielsystem als “Beobachtungen” aufgefasst. Die Koordinaten der Passpunkte im Ausgangssystem bilden die Stützstellen zur Bestimmung der Transformationsparameter, d. h. sie gehen in die Koeffizientenmatrix A ein. Die Elemente der Drehmatrix, r_{ij} , sind Funktionen der unbekannt Rotationsparameter, deren Formulierung von der Drehreihenfolge abhängt.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Zielsystem}} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{Startsystem}} \quad (27)$$

Die Ausgleichung basiert hier auf dem vermittelnden, iterativen Ansatz mit Näherungswerten. Eine feste Beobachtungsreihenfolge ist für den Aufbau aller Matrizen und Vektoren maßgeblich. Der Rechenweg ist (24) bis (26) nachempfunden.

6.2 Genauigkeitsbetrachtung für die Parameter der äußeren Orientierung

Sind die Markenpositionen und deren Genauigkeiten im übergeordneten und UAV-eigenen Koordinatensystem bekannt, kann hier eine Genauigkeitsberechnung über mehrere simu-

lierte Ausgleichungsrechnungen nach dem Vorbild der Monte Carlo Methode vorgenommen werden. Auch hier gilt, dass jeder Beobachtungssatz seinen eigenen empirischen Fehler erzeugt und nur über eine Reihe von Simulationen mit innerhalb der Genauigkeitsangaben modifizierten Beobachtungen Rückschlüsse auf das theoretische Fehlerverhalten gezogen werden kann. Dazu werden die Koordinaten der Marken sowohl im übergeordneten als auch im UAV-eigenen Koordinatensystem innerhalb der vorher berechneten Genauigkeiten mit einem Gauß-basierten Zufallsgenerator verfälscht und eine Ausgleichung berechnet. Alle ausgeglichenen Transformationsparameter werden gespeichert. Hieraus können Standardabweichungen, Mittelwert bzw. maximaler und minimaler Wert ermittelt werden.

6.3 Ergebnisse für die Genauigkeiten der Parameter der äußeren Orientierung

Da noch nicht bekannt ist, wie viele Marken am UAV wo und wie befestigt werden, wurde ein Testkoordinatensatz künstlich erzeugt. Dabei wurde ein Würfel mit der Kantenlänge von einem Meter definiert. Als Markenpositionen wurden die 8 Ecken und die 12 kantenhalbierenden Punkte benutzt. Dieser Würfel bildet in sich ein Koordinatensystem ab und ist mit dem UAV-Koordinatensystem vergleichbar. Da mehr Passpunkte vorliegen als nötig, wurden die Transformationsparameter über die vermittelnde Ausgleichung nach dem Modell aus (27) mit der Drehreihenfolge $R\phi R\omega R\kappa$ bestimmt. Um Genauigkeiten der Transformationsparameter zu bestimmen, wurden die Koordinaten des Zielsystems künstlich zufällig verfälscht und die Ausgleichung 10.000 mal wiederholt. Nach 10.000 Wiederholungen sind auch hier keine signifikanten Änderungen im Fehlerverhalten aufgetreten. Die einzelnen Transformationsparameter wurden gespeichert und ihr Verhalten zueinander analysiert. Einen Überblick über die Ergebnisse unterschiedlicher Transformationsvoraussetzungen geben die folgenden Tabn. 2 und 3.

In Tab. 2 wurden 10 und in Tab. 3 je 20 Marken für die Berechnungen der Genauigkeiten der Transformationsparameter herangezogen

und unter unterschiedlichen Koordinatengenauigkeiten des Zielsystems berechnet. Da es sich um Messmarken aus einem sehr leichten Material handelt, hängt die Anzahl der Marken lediglich von der Größe und Flugstabilität des UAV ab. Für z. B. die MD4-1000 wäre es kein Problem, 20 oder mehr Marken an Bord zu befestigen. In Abb. 2 sind bereits 8 Marken an einer MD4-1000 dargestellt. Bei 10 Marken und einer Positionsgenauigkeit der Marken von 5 mm können die Winkel auf ca. 0.16° genau bestimmt werden. Bei 20 Marken steigt die Winkelgenauigkeit auf ca. 0.11° . Aus 50 m Höhe würde das einen Versatz von ca. 10 cm am Boden bedeuten. Benutzt man Genauigkeiten für die Markenpositionen von 1 cm entstehen bei 10 Marken Winkelgenauigkeiten zwischen 0.29° bis 0.33° und bei 20

Tab. 2: Erreichbare Genauigkeiten mit 10 Marken.

Positionsfehler (m)	Rotationsparameter ($^\circ$)		
	σ_ω	σ_ϕ	σ_κ
0.005	0.15	0.15	0.16
0.010	0.30	0.29	0.33
0.015	0.45	0.44	0.49
0.020	0.61	0.57	0.66
0.025	0.74	0.71	0.82
0.030	0.91	0.87	0.98
0.035	1.06	1.00	1.14
0.040	1.21	1.14	1.29

Tab. 3: Erreichbare Genauigkeiten mit 20 Marken.

Positionsfehler (m)	Rotationsparameter ($^\circ$)		
	σ_ω	σ_ϕ	σ_κ
0.005	0.11	0.10	0.11
0.010	0.22	0.20	0.23
0.015	0.34	0.31	0.33
0.020	0.44	0.40	0.44
0.025	0.55	0.51	0.56
0.030	0.68	0.61	0.68
0.035	0.80	0.70	0.80
0.040	0.89	0.80	0.89

Marken Winkelgenauigkeiten zwischen 0.20° bis 0.23° . Hier wäre ein Versatz am Boden aus 50 m Höhe von ca. 20 cm vorhanden.

7 Fazit

Eine Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV durch ein terrestrisches System bestehend aus einem zielverfolgenden Videotachymeter, einem Reflektor und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV ist möglich, wobei im Beitrag zwei Varianten diskutiert und mathematisch beschrieben werden – die Einbild-Lösung und die Stereolösung. Mittels Varianzfortpflanzungsgesetz und Netzausgleichung werden Genauigkeitsabschätzungen für diese Varianten berechnet. Die Ergebnisse der Genauigkeitsberechnungen sowohl der Reflektor- als auch der Markenpositionen zeigen deutlich die Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen. Für die Berechnungen wurden lediglich die Beobachtungen (und Genauigkeiten) des Tachymetersystems, die Bildkoordinaten sowie die Kamerakonstante berücksichtigt. Zudem wurden Restriktionen eingeführt, die das mathematische Modell vereinfachen. Somit werden theoretische Werte für die Genauigkeiten berechnet, die auch eine Art oberste Genauigkeitsgrenze darstellen, da in der Realität weitere Fehlereinflüsse hinzu zu addieren sind, wie z. B. Refraktion, Bewegungsunschärfe, Eigendynamik und Leistungsgrenzen des Beobachtungssystems.

Dass solche Konstellationen durchaus interessant sind, zeigen die Entwicklungen der Gerätehersteller hin zum Videotachymeter in den letzten zwei Jahren. Ursprünglich zur Baudokumentation eingebaute Kameras in Tachymetern erfüllen heute sogar Messaufgaben. Hinzu kommen immer höhere Auflösungen und Videofunktionen dieser Kameras. Für Standbilder werden bereits die äußeren Orientierungsparameter mit aufgezeichnet. Zukünftig könnten Videotachymeter die äußeren Orientierungen der einzelnen Videobilder in Form von Zeitreihen geräteintern speichern. Derzeit sind die Videotachymeter jedoch noch nicht in der Lage, ein UAV in der Art und Weise, wie in diesem Beitrag be-

geschrieben, zu positionieren. Man könnte zwar einzelne Bilder vom UAV erstellen, jedoch müssten diese Bilder des UAV synchron zur Aktion am UAV ausgelöst werden, was noch nicht funktioniert.

Auch wenn diese Methode der Bestimmung der äußeren Orientierung eines UAV auf den ersten Blick recht aufwendig erscheint, bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, genauere Angaben der äußeren Orientierungsparameter zu bekommen. Zudem wird die Messung nicht an Bord des UAV durchgeführt, sondern terrestrisch, was zusätzliche Nutzlast an Bord des UAV schafft. Daher stellt eine Umsetzung der hier vorgestellten Ideen für praktische Anwendungen einen durchaus lohnenswerten Ansatz dar. Dies gilt einerseits besonders für Anwendungsfälle, in denen

- 1) ein UAV nicht mit zusätzlicher Sensorik und damit Gewicht ausgestattet werden soll und in denen
- 2) geodätisch-photogrammetrisches Equipment wie z. B. Videotachymeter und Kamera sowieso vorhanden ist, z. B. für Baustellenüberwachung.

Diese Verfahren würden sich zudem sehr gut dazu eignen, UAV-eigene Lagesensoren zu kontrollieren und zu kalibrieren. Aber auch eine Berechnung der äußeren Orientierungsparameter, die zusätzlich die an Bord befindlichen Sensordaten berücksichtigt, wäre denkbar.

Danksagung

Dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern sei für die Förderung des Projektes PFIFFikus gedankt, in dem diese Ergebnisse entstanden. Weiterhin sei den Reviewern für die zahlreichen und wichtigen Hinweise gedankt.

Referenzen

DOLD, J., 2004: Neue Laser-Technologien für die Industrievermessung. – PFG **2004** (1): 39–46.

- EISENBEISS, H., STEMPFHUBER, W. & KOLB, M., 2009: Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. – Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) **18**.
- GRENZDÖRFFER, G. & BILL, R., 2010: Unmanned Airborne Systems (UAS) – moderne und flexible Geodatenerfassung. – HARZER, B. (Hrsg., 2010): GIS-Report Software – Daten – Firmen 2010/11: 17–26, Bernhard Harzer Verlag.
- HENNES, E.R.E., 2008: A-TOM – eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung. – AVN **8–9/2008**: 301–310.
- JURETZKO, M., 2005: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. – Dissertation, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München.
- KIRSCHNER, H. & STEMPFHUBER, W., 2008: The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations. – A State of the Art Report on the Leica TPS1200+. – STEMPFHUBER, W. & INGENSAND, H. (eds.), MCG-Proceedings: 51–60.
- LEICA, 2011: Leica VIVA 15 Datenblatt. – http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/Viva%20TS15/brochures-datasheet/Leica%20Viva%20TS15%20Datasheet_de.pdf (9.12.2011).
- LUFTVO, 2010: Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). – <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvo/BJNR006520963.html> (11.1.2011).
- LUHMANN, T., ROBSON, S. & KYLE, S., 2006: Close-range photogrammetry. – 510, Whittles, Dunbeath.
- LUHMANN, T., 2009: Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **64** (3): 275–284.
- NIEMEIER, W., 2002: Ausgleichsrechnung. – Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. – Walter de Gruyter, Berlin.
- RESNIK, B. & BILL, R., 2009: Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. – 3. Auflage. Wichmann, Offenbach.
- TRIMBLE, 2011: Trimble S8 datasheet. – http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390413/022543-410F-D_TrimbleS8_DS_1011_sec.pdf (9.12.2011).
- WASMEIER, P., 2009: Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. – 149, DGK Reihe C, Heft Nr. 638, München.

Anschrift des Autors:

Dipl.-Ing. F. NIEMEYER, Prof. Dr.-Ing. R. BILL, Dr.-Ing. G. GRENZDÖRFFER, Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18056 Rostock, Tel. +49-381-498-3200, Fax +49-381-498-3202, {frank.niemeyer}{ralf.bill}{goerres.grenzdoerffer}@uni-rostock.de

Manuskript eingereicht: Juli 2011
Angenommen: Januar 2012

