

# **Photogrammetrische Bestimmung von Flugzeuggeschwindigkeiten auf Rollfeldern**

Steffen SCHELLER, Hans-Gerd MAAS, Ellen SCHWALBE

## **Zusammenfassung**

Photogrammetrische Messsysteme zu Geschwindigkeitsmessung werden heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt (RICHTER 2001, SEIZ 2001). Im vorliegenden Paper wird eine Realisierung zur Messung von Flugzeuggeschwindigkeiten vorgestellt, aufbauend auf einem monoskopischen Kamerasystem. Die Grundidee ist die Verwendung einer Kamera mit einer stabilen Bildwiederholfrequenz wodurch die Zeitkomponente bestimmt werden kann. Desweiteren werden Näherungskordinaten, z.B. aus einem Geoinformationssystem, für alle relevanten Positionen der Aufnahmekonfiguration benötigt. Aus diesen Komponenten wird der zurückgelegte Weg pro Zeitintervall berechnet. Das System wurde speziell für die Fraport AG Frankfurt zur Messung auf Rollfeldern entwickelt. Es ist so aufgebaut, dass in einer Kurve an 5 fest definierten Punkten die Geschwindigkeiten bestimmt werden können. Im Folgenden wird das Verfahren und der Aufbau des Messsystems näher beschrieben.

## **1 Einleitung**

### **1.1 Aufgabe**

Die Motivation der vorliegenden Arbeit basiert auf der Idee in einem Kurvenabschnitt Geschwindigkeiten von Flugzeugen auf Rollfeldern zu messen. Die Punkte an denen Geschwindigkeiten bestimmt werden sollen, müssen fest definierbar sein um Messungen miteinander vergleichbar zu machen. Die einzelne Geschwindigkeitsmessung soll in jedem Messpunkt mit einer Genauigkeit  $\pm 5$  km/h erfolgen.

Darüber hinaus soll das Messsystem flexibel einsetzbar sein, so dass verschiedene Kurvenabschnitte beobachtet werden können. Der Schwerpunkt liegt auf der ersten Kurve nach der Landung eines Flugzeuges bzw. in dem Bereich wo das Flugzeug von der Landebahn auf den „taxi way“ abbiegt. An welcher Position das Flugzeug die Landebahn verlässt (pro Landebahn min. 4 Möglichkeiten) liegt im Ermessen des Piloten. Einflussgrößen hierbei können Gewicht, Größe, Aufsetzpunkt des Flugzeuges und Wetterlage sein. Das Geschwindigkeitsmess-

system soll im Nachhinein zur Validierung von Wettereinflüssen, typspezifischen Geschwindigkeitsunterschieden oder Pilotenerfahrung genutzt werden. Weitere Forderungen an das Messsystem waren das Einhalten eines fest definierten Sicherheitsabstandes zu den Flugzeugen und die Gewährleistung des uneingeschränkten Flugverkehrs.

Der geforderte Messumfang umfasst fünf fest definierte Punkte (G1, BA, BM, BE, G2) entlang einer Kurve (Abbildung 1). Nach Untersuchung der in Frage kommenden Kurvenabschnitte auf dem Flughafen, wurde eine zu berücksichtigende mittlere Kurvenlänge von ca. 200m festgelegt. Dieser Kurvenabschnitt muß durch das Messsystem abgedeckt werden.



Abb. 1: Kurvenverlauf Landebahn Süd auf JTO (Abrollweg) mit den definierten Kurvenabschnitten (G1, BA, BM, BE, G2)

## 1.2 Validierung

Zur Umsetzung der genannten Aufgabe wurden mehrere schon bestehende Messsysteme auf ihre Eignung untersucht.

Ein Lichtschrankensystem würde z.B. die positionsgebundene Geschwindigkeitsmessung erfüllen, ist aber nicht flexibel einsetzbar und

müsste entsprechend den Forderungen an mehreren Kurvenabschnitten installiert werden. Eine Radarpistole ist hingegen flexibel einsetzbar, kann aber die Positionsabhängigkeit der Messwerte nicht gewährleisten. Eine weitere Möglichkeit bestand in der Verwendung einer Stereokameralösung. Aufgrund der aufwendigen Kalibrierung bei einem Standortwechsel bzw. aufgrund der schleifenden Schnitte bei einer festen Basis wurde die Stereokameralösung verworfen. Weitere Überlegungen konzentrierten sich auf die Verwendung von nur einer Kamera.

### 1.3 Konzept

Die Realisierung eines monoskopischen Kamerasystems hat mehrere Vorteile. Es ist flexibel einsetzbar und die Synchronisationsfehler, die bei Verwendung mehrerer Kameras auftreten, entfallen. Die Zeitkomponente, die für eine Geschwindigkeitsmessung erforderlich ist, kann durch eine exakte Bildwiederholfrequenz bestimmt werden.

Die Grundidee basiert auf der Aufnahme eines Objektes zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, der Identifizierung des Objektes im Bild und der Berechnung der Winkelunterschiede beider Objektstrahlen. Als Ergebniswert wird ein Winkel pro Zeitintervall erhalten.

Die größte Herausforderung bestand in der Lösung des Maßstabsproblems, d.h. die Bestimmung der Entfernung von der Kamera zum Flugzeug. Ein weiterer Fehlereinfluss sind die veränderlichen Richtungswinkel des Flugzeuges gegenüber der Kamera während einer Kurvendurchfahrt. Erste Überlegungen führten dazu feste Maßstäbe an den verschiedenen Flugzeugen zu suchen (z.B. Fensterabstände, Radgrößen). Aufgrund der verschiedenen Flugzeugtypen und deren Unterkategorien wurde von dieser Möglichkeit abgesehen. Eine weitere Variante bestand darin, die Positionen des Messaufbaus als Näherungen vorzugeben. Bei dieser Möglichkeit summieren sich allerdings eine Vielzahl von Fehlereinflüssen, welche bei der Fehlerabschätzung berücksichtigt werden müssen.

Die Grundidee bestand darin, den Standpunkt der Kamera und die Positionen der Kurvendurchfahrt (G1, BA, BM, BE, G2) in erster Näherung vorzugeben (Abbildung 1). Mit Hilfe dieser Näherungen kann auf die Fahrtrichtung und auf die Entfernung zwischen Messobjekt und Kamera geschlossen werden. Darauf basierend ist es möglich den zurückgelegten Weg zwischen zwei Zeitpunkten (Bildaufnahmen) zu bestimmen. Über das Vorwissen der hinreichend genauen Bildwiederholfrequenz kann im Anschluss die Strecke pro Zeitintervall berechnet werden.

Alle im Kapitel 1.1 genannten Forderungen können dementsprechend mit einer monoskopischen Kamerasystemlösung und der Verwendung von Näherungskordinaten erfüllt werden.

## 1.4 Genauigkeitsabschätzung

Für den Aufbau des vorgestellten Kameramesssystems wurde untersucht, ob die geforderte Genauigkeit von  $\pm 5$  km/h eingehalten werden kann.

Folgende Hauptfehlereinflüsse wirken auf das Messsystem:

Positionierungsfehler Fahrbahn:  $\pm 1$  m

Positionierungsfehler Standpunkt:  $\pm 1$  m

Abweichung des Flugzeuges von der Ideallinie:  $\pm 5$  m

Positionierungsfehler des Matching Algorithmuses:  $\pm 0.05$  m (1/10 Pixel)

Mit dem Ziel, die oben genannten Fehlereinflüsse zu minimieren, wurde die Entfernung von der Kamera zum Flugzeug so groß wie möglich gewählt, so dass der eingeschlossene Winkel der Objektstrahlen zwischen Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_1$  minimal wird. Bei einer Fehlerabschätzung mit einer Bildwiederholfrequenz von 3,75 Hz und einer maximalen Geschwindigkeit des Flugzeuges von 30 m/s (fiktiv) ergab sich ein Erwartungswert des Geschwindigkeitsfehlers von  $\pm 3,6$  km/h (Forderung:  $\pm 5$  km/h).

## 2 Messsystem

### 2.1 Aufbau

Das endgültige Messsystem besteht aus einer monoskopischen Kamera mit einem Standard Zoom Objektiv. Die Entfernung zwischen Kamera und Flugzeug wurde im aufgeführten Standpunktbeispiel auf 430m festgelegt (Abbildung 1). Die Ausrichtung der Kamera erfolgt hierbei im rechten Winkel zur Tangente am Bogenmittelpunkt des Kurvenabschnitts. Diese Festlegung ist Voraussetzung für die gleichmäßige Beobachtung des Flugzeuges, was wiederum die Grundlage für die Texturverfolgung über die Aufnahmesequenzen bildet (Kapitel 2.5).

Für die Ausrichtung der Kamera war darüberhinaus ein Orientierungspunkt erforderlich, weil von einem Großteil der Standpunkte die Fahrbahn nicht direkt sichtbar war. Der Orientierungspunkt dient zur Bestimmung der Rotationswinkel der äußeren Orientierung (Kapitel 2.4).

### 2.2 Hardware

Die Realisierung des Messsystems erfolgte mit einer TIS Kamera, welche einen 1280x960 großen CCD-Sensor mit einer Sensorgroße von 6,0x4,5 mm besitzt (Abbildung 2). Die maximale Bildwiederholfrequenz

beträgt 15 Hz. Die Bestimmung der Frequenzstabilität ergab eine Genauigkeit von 1/500 s. Aufgrund der verwendeten Hardware zur Speicherung der Daten konnte nur mit einer Bildwiederholfrequenz von 3,75 Hz gearbeitet werden. Die Datenübertragung erfolgte mittels einer Firewire Schnittstelle.

Als Optik wurde ein Canon Zoom Objektiv mit einer variablen Brennweite von 10-40 mm verwendet. Das Objektiv wurde auf 12 mm fixiert und im Anschluss gemeinsam mit der Kamera kalibriert. Die Brennweite von 12 mm resultiert aus den vorgegebenen 200 m Kurvendurchfahrt des Flugzeuges.

Zur Datenspeicherung wurde ein Laptop mit einem PII Prozessor 500 Mhz und 512 MB RAM verwendet. Die Stromversorgung erfolgte über eine Autobatterie. Das gesamte Messsystem konnte mit der aufgeführten Konfiguration 6 Stunden betrieben werden.



Abb. 3: links: Kamera TIS auf Standpunkt 512 (Frankfurter Flughafen), rechts: Bilder aus 3 verschiedenen Messsequenzen

### 2.3 Softwareumsetzung

Die Akquisition der Bildsequenzen erfolgte mittels einer Kamera eigenen Software. In dieser werden die zu verwendende Bildwiederholfrequenz, Belichtungszeit, Gain und der Speicherpfad angegeben.

Zur einfachen Auswertung der einzelnen Bildsequenzen wurde eine Software entwickelt, welche den individuellen Messaufbau verarbeiten und die geforderten Geschwindigkeitswerte bestimmen kann. Für den bildtechnischen Zugriff wurde die Softwarebibliothek OpenCV verwendet. Desweiteren wurde eine Oberfläche entwickelt, die einen schnellen Zugriff auf alle Funktionen ermöglicht. Alle nachfolgenden Kapitelunterpunkte wurden in der Programmiersprache C++ umgesetzt und in eine Programmoberfläche integriert.

## 2.4 Orientierung

Mit dem Ziel die Kamera in das Objektkoordinatensystem des Kurvenabschnittes zu überführen, müssen die Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden. Die Näherungskoodinaten des Kamerastandpunktes und des Orientierungspunktes stehen, wie in Abschnitt 1.3 erläutert, zur Verfügung. Die fehlenden Rotationswinkel der äußeren Orientierung ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) können über den Richtungswinkel und den Höhenunterschied zwischen Kamerastandpunkt und Orientierungspunkt bestimmt werden. Der Winkel  $\kappa$  wurde mit Hilfe einer handelsüblichen Libelle auf dem Kameragehäuse fixiert.

Die Winkel  $\omega$  und  $\varphi$  können aus den Näherungskoodinaten und den Bildkoordinaten des Orientierungspunktes berechnet werden. Hierbei wird als erster Schritt der Winkel  $\omega$  um  $90^\circ$  erhöht, damit die Kamera eine horizontale Lage einnimmt. Mit Hilfe des Richtungswinkels zwischen Kamerastandpunkt und Orientierungspunkt und nach Anbringung des Höhenunterschiedes wird der Sensorursprung auf den Orientierungspunkt ausgerichtet. Der zweite Schritt ist die Messung des Orientierungspunktes im Bild. Durch die Bildkoordinaten können jetzt  $\omega$  und  $\varphi$  (unter Berücksichtigung der Verzeichnungsparameter, siehe LUHMANN (2000)) so verbessert werden, dass der Orientierungspunkt und der Bildpunkt exakt aufeinander abgebildet werden.

## 2.5 Bildsequenzanalyse

Für die automatische Verfolgung des Flugzeuges in einer Sequenz wird ein Kreuzkorrelations-Algorithmus verwendet (OpenCV) (Formel 1).

$$k = \frac{\sum_x \sum_y g_1(x', y') \cdot g_2(x+x', y+y')}{\sum_x \sum_y g_1(x', y')^2 \cdot \sum_x \sum_y g_2(x+x', y+y')^2} \quad \text{mit } -1 \leq k \leq 1 \quad (1)$$

Dieser verfolgt in einem vordefinierten Fenster eine eindeutig zu identifizierende Textur auf dem Flugzeug. Das Verfolgen des jeweiligen Firmen Logos der Betreibergesellschaften auf den Flugzeugen hat sich als vorteilhaft erwiesen. Darauf aufbauend wurde ein Subpixelalgorithmus

implementiert, welcher ein elliptisches Hyperboloid in die Verteilung des Kreuzkorrelationsbildes einpasst (vgl. MAAS 2006). Somit können, bei eindeutiger Ausbildung des Kreuzkorrelationsmaximas, Genauigkeiten besser 1/10 Pixel erreicht werden. Die extrahierten Bildpunktkoordinaten definieren die einzelnen Positionen, die zur Geschwindigkeitsberechnung herangezogen werden.

## 2.6 Auswertung

Nach Eingabe der Näherungskordinaten für Standpunkt, Orientierungspunkt und Kurvenverlauf (Eingabe in Form einer Textdatei), wird die zu verwendende Bildsequenz eingelesen.

Der erste Schritt ist die Festlegung des Orientierungspunktes im Bild. Diese Bildkoordinate wird im Anschluss zur Berechnung der Kameraorientierung verwendet (Kapitel 2.4). Der zweite Schritt ist die Festlegung des Startpunktes für das Matching. Hierbei sollte eine eindeutige Textur auf dem Flugzeug gewählt werden. Bei auftretenden Fehlern 2. Art die trotz einer Plausibilitätsprüfung nach dem Matching nicht erkannt werden, kann der Nutzer in der Sequenz den Algorithmus neu starten. Dieser Schritt wird ermöglicht da zur Geschwindigkeitsberechnung nur jeweils benachbarte Bilder herangezogen werden.

Nach erfolgreicher Bildanalyse werden die Positionen des Kurvenabschnittes berechnet. Hierbei wird auf die Vereinfachung Gerade-Kreisbogen-Gerade zur Kurvenbeschreibung zurückgegriffen. Dieser Schritt ist möglich da im Fehlerhaushalt des Messsystems eine Abweichung von der Ideallinie von  $\pm 5\text{m}$  angenommen wurde.

Im Anschluß wird eine Fläche berechnet, die senkrecht auf der Fahrbahn entlang des Kurvenverlaufs steht (Abbildung 3). Der Kurvenverlauf wird in erster Näherung durch 10cm kleine Teilbereiche beschrieben. Durch die Verschneidung der Objektstrahlen, welche auf Grundlage des Matchingalgorithmus entstehen, mit der erstellten senkrechten Fläche, wird eine 3D Position über der Fahrbahn erhalten. Durch die senkrechte Projektion der erhaltenen 3D Position auf die Fahrbahnoberfläche werden die einzelnen Streckenintervalle im Kurvenverlauf definiert. Für die Berechnung der Geschwindigkeit ist das Vorwissen der Taktfrequenz entscheidend. Anhand zweier aufeinander folgenden Positionen wird die zurückgelegte Wegstrecke berechnet. Anhand der Taktrate der Kamera ergibt sich eine Strecke pro Zeitintervall (Geschwindigkeit).

Mit Hilfe dieser zufällig verteilten Geschwindigkeitsmessungen wird im Anschluss eine jeweils mittlere Geschwindigkeit an den fünf fest vordefinierten Kurvenabschnitten berechnet.

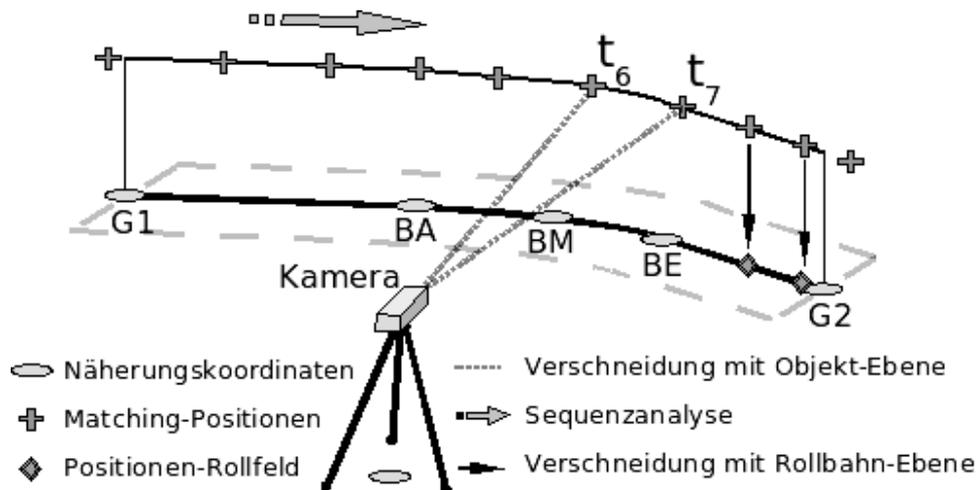


Abb. 3: Systemaufbau und Verschneidung der Objektstrahlen

### 3 Zusammenfassung

Dieses Paper zeigt die erfolgreiche Umsetzung eines Geschwindigkeitsmesssystems für Flugzeuge auf Rollfeldern bei einer Kurvendurchfahrt mit Hilfe einer monoskopischen Kamera. Das Messsystem wurde speziell für die FRAPORT AG Frankfurt entwickelt. Die Messung von Geschwindigkeiten ist besser  $\pm 5$  km/h möglich. Das Messsystem wurde operativ für mehr als 50 Messungen auf dem Frankfurter Flughafen eingesetzt.

### 4 Literaturangaben

- Luhmann T., (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Maas, H.-G., Dietrich, D., Schwalbe, E., Bäßler, M., Westfeld, P. (2006): *Analysis of the motion behaviour of Jakobshavn Isbræ glacier in Greenland by monocular image sequence analysis*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5, pp. 179-183

Richter M., Lisztwan M., Grebeníček F. & Zemčík P. (2001): *One CCD Camera Measurement of Vehicle Velocity*. Summaries Volume Process Control 01, S. 95-96, ISBN 80-227-1542-5

Seiz, G., Gruen, A., (2001): *Digitale Photogrammetrie in der 3D-Wolkenmessung*, DACH Conference, Wien, S. 18-21.