

MESSUNG VON FORM UND DEFORMATION AN NATÜRLICH TEXTURIERTEN OBERFLÄCHEN MITTELS OPTISCHEM FLUSS

SHAPE AND DEFORMATION MEASUREMENT OF NATURALLY TEXTURED SURFACES USING OPTICAL FLOW

A. Friedl, C.J. Kähler

Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr, Neubiberg

Optischer Fluss, Deformation, Vogelflügel, Freiflug, Stereosehen
optical flow, deformation, birds wing, free flight, stereo matching

Zusammenfassung

Es wird eine Messmethode zur zeit-aufgelösten Bestimmung der dreidimensionalen Form und Verformung von Oberflächen mit natürlicher Textur vorgestellt. Diese berührungslose Technik kann sinnvollerweise zum Beispiel zur Vermessung der Flügel-Form und Profilierung von Vögeln oder Insekten in Freiflugexperimenten, die nach wie vor im Fokus der Forschung stehen, eingesetzt werden. Die dargestellte Methode basiert auf der Kombination von der Tiefeninformation der Oberfläche mit einer Bewegungsanalyse, zur Vermessung und Abgrenzung des zu messenden Objekts. Dieses Vorgehen verspricht eine verbesserte Ausnutzung der vorhanden örtlichen und zeitlichen Information.

1. Einleitung

Die erstaunlichen Flugleistungen von Vögeln stimulieren die Untersuchung des Schlagflugs und seine technische Umsetzung seit Generationen. Während der Vortriebswirkungsgrad mittlerweile weitgehend geklärt ist [1], versagen numerische und experimentelle Methoden bei der Analyse der Flugleistungen durch die komplizierte Anpassung und Verformung der Flügel-Form während einer Schlagperiode.

Umfangreiche Profilvermessungen wurden bisher nur an betäubten [2] oder getöteten [2, 3] Tieren durchgeführt. Das natürliche Verhalten von Muskeln und Federn, dem maßgeblicher Einfluss zugeschrieben wird, ist dabei gegenüber den wirklichen Flugbedingungen stark verfälscht. Für eine unbeeinflusste Untersuchung der instationären Bewegung und Verformung des Flügels muss die Vermessung im Freiflug stattfinden.

Diese herausfordernde Aufgabe kann durch die Verwendung eines Laserscanners gelöst werden. Einerseits ist der typische Aufbau von Laserscannern im Zusammenbau, dem Auswerteaufwand und im Preis nicht sehr aufwändig. Andererseits liefert aber die punktweise Vermessung als Nachteil ein grobes Auflösungsvermögen und keine zeitgleiche Bestimmung von zwei Messpunkten (wenn auch der Zeitversatz für aktuelle Laserscanner sehr klein ist). Um diese Nachteile zu überwinden können zweidimensionale Messverfahren angewendet werden. In diesem Projekt werden zwei grundlegend unterschiedliche Methoden aufgezeigt und verglichen. Einerseits wird ein übliches Korrelations-Verfahren verwendet, um Muster in Bildern zu erkennen und daraus Form und Bewegung zu bestimmen. Diese Technik ist weitverbreitet und bietet ausgereifte Algorithmen mit großer Genauigkeit bei überschaubarem Rechenaufwand.

Zur korrelations-basierten Mustererkennung kann die natürliche Textur von Vogelflügeln nur begrenzt verwendet werden, zum Beispiel in Bereichen mit starkem Kontrast. In Bereichen

mit nicht nutzbarer Textur ist es nötig ein passendes Muster über Bemalung oder Projektion aufzubringen [4]. Eine nachteilige Beeinflussung der Tiere durch Farbe ist zu erwarten, da zusätzliche Masse aufgebracht wird (die besonders störend für kleine Vögel und vor allem Insekten ist). Das Verkleben und Versteifen verfälscht das natürliche Verhalten der einzelnen Federn zusätzlich und verändert daher möglicherweise das Verhalten und damit die Flugeigenschaften des Flügels insgesamt. Diese Beeinflussung kann durch die Projektion eines Musters reduziert werden, wodurch aber Schwierigkeiten einer aufwändigen und empfindlichen Abstimmung auf die Aufnahmekonfiguration, wie Hintergrundbeleuchtung oder Belichtungszeit, eingeführt werden.

Um die systematisch begrenzte räumliche Auflösung von korrelations-basierten Messmethoden zu vermeiden, werden Algorithmen, die auf optischem Fluss aufbauen, untersucht. Diese Methoden versprechen eine dichte Vermessung (für jedes Pixel wird eine Höheninformation bestimmt) bei reduzierten Anforderungen an die Textur der zu untersuchenden Oberflächen.

2. Messmethodik

Die Formmessung von Oberflächen besteht aus zwei Teilen: (i) die Bestimmung der Höheninformation der Oberfläche und (ii) der Erkennung des Messobjektes und dessen Separation vom Hintergrund. Beide Aufgaben können mit Methoden des optischen Flusses gelöst werden, welche Vorteile versprechen im Vergleich zu korrelations-basierten Techniken, wie sie von PIV (Particle Image Velocimetry), BOS (Background Oriented Schlieren Methode) oder dem kommerziellen ARAMIS System [5] bekannt sind.

2.1 Bestimmung der drei-dimensionalen Punktwolke

Das grundlegende Messprinzip zur Bestimmung von drei-dimensionalen Punktwolken einer beobachteten Oberfläche ist weitläufig bekannt, auch im Bereich der digitalen Bildverarbeitung und des „Maschinen-Sehens“. Über eine stereoskopische Konfiguration von zwei oder mehreren synchronisierten Kameras wird die zu vermessende Oberfläche wie in Abbildung 1 gezeigt beobachtet.

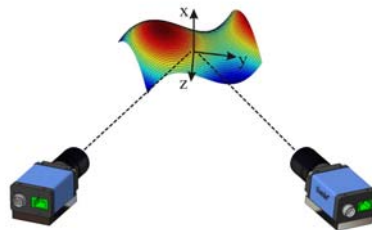


Abb. 1: Aufnahmekonfiguration

Die Messgenauigkeit der berechneten z-Komponente (in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Kameras) wird mit größerem Beobachtungswinkel verbessert [6]. Andererseits verstärkt sich durch einen breiteren Kameraaufbau die Möglichkeit von Verdeckungen, bei denen ein Teil einer rauen oder unebenen Oberfläche nur von einer Kamera aufgenommen werden kann. Es ist also ein Kompromiss zu finden zwischen Genauigkeit und Größe von Verdeckungen, die nur über eine Interpolation zwischen Bereichen, die für beide Kameras sichtbar sind, gefüllt werden können.

Die Entzerrung und Rektifizierung der Aufnahmen erfolgt mittels der internen und externen Orientierungs-Parameter des Kameraaufbaus, die über eine Kalibrierung bestimmt werden [7]. Entsprechende Punkte auf der Oberfläche liegen in den beiden korrigierten Bildern auf der gleichen vertikalen Koordinate. Bei geeigneter Textur kann die Bestimmung des entsprechenden horizontalen Abstandes über korrelations-basierte Methoden erfolgen. Einfache Kreuzkorrelations-Algorithmen zeigen grundlegende Nachteile, die durch spezielle Strategien teilweise verbessert werden können [8, 9]. Zum Einen wird die Kreuzkorrelation sinnvollerweise in bestimmten Abfragefenstern durchgeführt, wodurch die Auflösung der berechneten Verschiebungen auf die Größe der Fenster beschränkt ist. Kleine Abfragefenster sind andererseits fehleranfälliger und rauschempfindlicher als große Fenster,

die üblicherweise eine robuste Auswertung ermöglichen. Die kleinstmögliche Größe der Abfragefenster muss daher in Abstimmung mit der Robustheit der verwendeten Methode festgelegt werden. Zusätzlich beschränkt die Zahl der nötigen Rechenschritte, die proportional mit Zahl der Abfragefenster wächst, die Fenstergröße auf ein bestimmtes Mindestmaß.

In Bereichen mit starken Verschiebungsunterschieden zeigen Korrelations-Methoden weniger deutliche Lösungen, da nur die mittlere lineare Verschiebung innerhalb eines Abfragefensters bestimmt werden kann. Starke Gradienten führen daher zu einem weniger ausgeprägtem Maximum innerhalb der entsprechenden Korrelations-Ebene.

Um diese Einschränkungen der korrelations-basierten Methoden zu vermeiden wird hier ein anderes Verfahren vorgestellt, das auf einem ebenfalls weitverbreiteten Prinzip aufbaut, dem optischen Fluss. Optischer Fluss bezeichnet die Bestimmung einer beliebigen Bewegung durch Auswertung einer Bildfolge. Dabei wird die grundlegende Annahme einer konstanten Intensität $I(x, y, t)$ entsprechender Bildbereiche vorausgesetzt.

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) \quad (1)$$

Über eine Taylor-Entwicklung ergibt sich also:

$$I(x, y, t) + \partial_x I(x, y, t) \cdot \Delta x + \partial_y I(x, y, t) \cdot \Delta y + \partial_t I(x, y, t) \cdot \Delta t + \dots = I(x, y, t) \quad (2)$$

Die übliche Annahme, dass die Bewegung durch ein Verschiebungs- oder Geschwindigkeitsfeld $\vec{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ hervorgerufen wird, liefert eingesetzt in Gleichung (2) (Argument (x, y, t) und höhere Terme nicht berücksichtigt):

$$\partial_x I \cdot u \cdot \Delta t + \partial_y I \cdot v \cdot \Delta t + \partial_t I \cdot \Delta t = 0 \quad (3)$$

Gleichung (3) geschrieben in Vektornotation verdeutlicht, dass die Lösung dieser Gleichung einen Fall beinhaltet:

$$\nabla I \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \partial_t I = 0 \quad (4)$$

Für den Fall eines Bewegungsvektors $\vec{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$, der senkrecht zum Gradienten der Intensitätsverteilung ∇I ausgerichtet ist, kann die Bewegung nicht über Gleichung (4) bestimmt werden. Dies ist als „Apertur-Problem“ bekannt und kann über die zusätzliche Forderung eines glatten Geschwindigkeitsfeldes gelöst werden.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten diese Zusatzbedingung in die Formel des optischen Flusses zu integrieren, die aus Gleichung (4) hervorgeht:

$$\int_{\Omega} \left(\nabla I \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \partial_t I \right)^2 dx = 0 \quad (5)$$

Globale Algorithmen, wie die von Horn und Schuck [10] eingeführte Methode, ergänzen einen normalisierenden Glattheitsterm. Lokale Algorithmen hingegen unterteilen das Bild in Fenster, in denen örtliche Konstanz, wie in der Lukas-Kanade Methode [11], oder örtliche und zeitliche Konstanz, wie in der Bigün Methode [12], gefordert werden. Wie von Scharstein et al. [13] gezeigt wird stellen globale Glattheitsbedingungen die bessere Wahl für Bildbereiche mit sehr wenig oder keiner Textur dar, während starke Intensitäts-Gradienten besser durch lokale Methoden ausgewertet werden.

Die einfachste Implementierung der lokalen Glattheitsbedingung ist die Definition von festen Fenstern mit einer bestimmten Größe. Speziell in Bereichen von Unstetigkeiten lässt sich die Genauigkeit der lokalen OF (optischer Fluss) Methoden durch unterschiedliche Fenstergrößen, iterativ deformierte Fenster oder aus der vorgehenden Bildfolge berechnete und vorhergesagte Fensteranzahl erhöhen [14]. In diesem Bereich wurden in den letzten Jahren einige robuste und präzise Algorithmen entwickelt, die sich zuverlässig auch zur technischen Vermessung einsetzen lassen. Speziell die Anwendung auf stereoskopische Bildpaare, wobei ein Verschiebungsfeld gefunden werden muss, das die beiden Bilder möglichst gut zur Überlappung bringt, ist ein Schwerpunkt der Forschung.

Die zu vermessenden technischen Oberflächen können Texturen mit unterschiedlichsten Intensitätsgradienten aufweisen, zum Beispiel bei Vogelflügeln speziell in den Bereichen der Übergänge von einer Feder zur nächsten. Zur Auswertung werden daher Methoden des optischen Flusses mit lokalen Glattheitsbedingungen vorgeschlagen, wie zum Beispiel die von Ogale und Aloimonos [15] entwickelte Technik. Dabei werden Phasenunterschiede zum lokalen Abgleich verwendet und zusätzlich mit Tiefensegmentierung, Neigungsabschätzung und Verdeckungserkennung kombiniert.

Die Verwendung von Methoden des optischen Flusses in PIV-Anwendungen ist durch die mögliche Bewegung von Partikeln aus dem Lichtschnitt heraus oder hinein beschränkt [16]. Diese „out-of-plane“ Bewegung führt zu einer Verletzung der grundlegenden Annahme der konstanten Intensität in entsprechenden Bildbereichen. Zusätzliche Verfälschungen dieser Annahme ergeben sich durch das Rauschen und den diskreten Aufbau von digitalen Kameras, auch die unterschiedliche Laserbeleuchtung zwischen zwei Pulsen führt zu unterschiedlichen Intensitäten.

Im Fall der stereoskopischen Vermessung von Form und Deformation einer beobachteten Oberfläche ist das Problem einer „out-of-plane“ Bewegung nicht gegeben. Durch unterschiedliche Beobachtungsabstände und –richtungen der beiden Kameras kann aber keine im gesamten Bildbereich übereinstimmende Intensität beobachtet werden. Diese Beeinträchtigung kann durch die Analyse der Phasenunterschiede umgangen werden.

Die Vermessung von nahezu beliebigen Oberflächen (Sichtfeld und Schärfentiefe muss beachtet werden) erfordert eine Auswertemethode, die stark unterschiedliche Verschiebungen bestimmen kann. Lokale Methoden des optischen Flusses sind üblicherweise fähig, kleine Verschiebungen sehr genau zu identifizieren, während große Verschiebungen zu Uneindeutigkeiten und Fehlinterpretationen führen können. Ein übliches Verfahren diese Problematik zu lösen ist die Anwendung einer sogenannten Bild-Pyramide [17], die durch kontinuierliches Vergrößern der Ausgangsbilder erzeugt wird. Die Analyse des größten Bildpaares, in denen der Betrag der Verschiebung ausreichend reduziert wurde, liefert die Hauptanteile der Verschiebung. Zusätzliche Anteile werden mit den feineren Bildpaaren innerhalb der Bild-Pyramide bestimmt. Da im Bildpaar mit der größten Auflösung feine Strukturen verwischt oder ausgelöscht werden, können große Bewegungen von kleinen Strukturen nur identifiziert werden, wenn die Richtung der Bewegung nahe an der der größeren Bereiche liegt.

Damit ergibt sich ein Berechnungsablauf, der wie in Abbildung 2 gezeigt mit der Umformung der ursprünglichen Bilder in Phasenbilder beginnt, deren Auflösung anschließend in mehreren Schritten vergrößert wird.

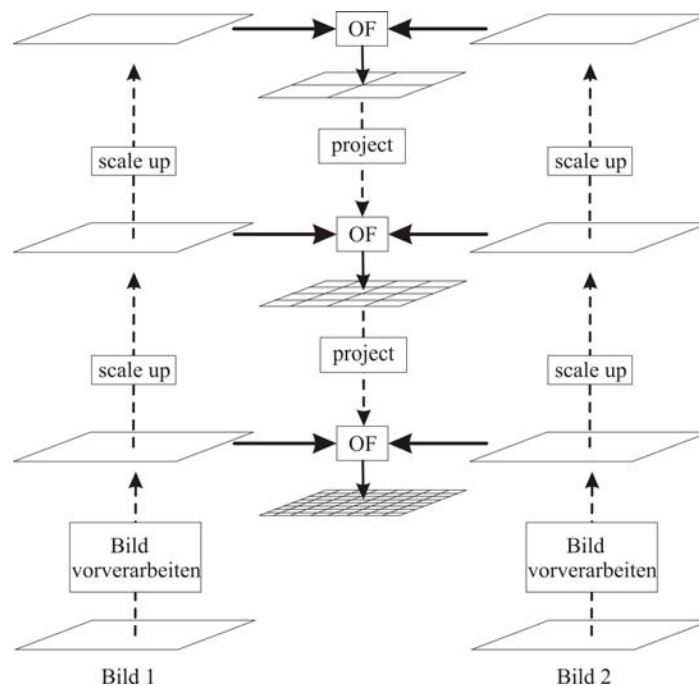


Abb. 2: Berechnungsablauf

Sobald eine angemessene Auflösung erreicht ist und entsprechende Verschiebungen klein genug sind, kann eine erste Berechnung des optischen Flusses durchgeführt werden. Das erhaltene Verschiebungsfeld wird zur Verzerrung eines Bildes verwendet, um so die Unterschiede zwischen den beiden Bildern zu verringern. Im nächsten feiner aufgelösten und verzerrten Bildpaar wird anschließend ein verfeinerter optischer Fluss bestimmt. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis die ursprüngliche Auflösung erreicht ist.

2.2 Verschiebungsfelder durch Korrelation

Die verwendeten Korrelations-Algorithmen basieren auf einer Mustererkennung, die vorgegebene Muster in einem Bild über die Berechnung einer Kreuzkorrelations-Funktion sucht:

$$R_{CC}(m,n) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l (I_1(m+u, n+v) \cdot I_2(m,n)). \quad (6)$$

Die Kreuzkorrelation liefert ein Ähnlichkeitsmaß $R_{CC}(m,n)$, das umso größer ist, je ähnlicher sich die beiden Bildausschnitte sind. Diese nicht normalisierte Form der Kreuzkorrelation wird allerdings in der Praxis seltener eingesetzt, da Helligkeitsunterschiede zu ändernden Ähnlichkeitsmaßen führen.

Die normalisierte Form lautet:

$$R_{CC, norm}(m,n) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l \left(\frac{(I_1(m+u, n+v) - \bar{I}_1)}{\|I_1\|_H} \cdot \left(\frac{I_2(m,n) - \bar{I}_2}{\|I_2\|_H} \right) \right), \quad (7)$$

wobei \bar{I}_1 , bzw. \bar{I}_2 dem arithmetischen Mittelwert und $\|I_1\|_H$, bzw. $\|I_2\|_H$ der Frobeniusnorm der betrachteten Bildbereiche entsprechen. Damit werden sowohl additive als auch multiplikative Helligkeitsunterschiede ausgeglichen.

Eine weitere (weniger gebräuchliche) Korrelations-Methode, die ein zu minimierendes Fehlermaß berechnet, ist die Summe der quadrierten Differenzen („sum of squared differences“ SSD):

$$R_{SSD}(m,n) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l (I_1(m+u, n+v) - I_2(m,n))^2. \quad (8)$$

Bei vollständiger Übereinstimmung der Bildausschnitte ergibt sich ein Fehlermaß $R_{SSD}(m,n)$ von Null. Einzelne nicht übereinstimmende Pixel wirken sich in dieser Methode durch das Quadrieren stark aus. Durch die Bestimmung der Summe der absoluten Differenzen („sum of absolute differences“ SAD) lässt sich dieser Effekt reduzieren:

$$R_{SAD}(m,n) = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-l}^l |I_1(m+u, n+v) - I_2(m,n)|. \quad (9)$$

Die Berechnung der Höheninformation aus entzerrten stereoskopischen Aufnahmen beschränkt sich auf die Bestimmung der Disparitäten zwischen zwei Aufnahmen in einer Koordinatenrichtung. Dabei bleibt der Rechenaufwand trotz der zusätzlich nötigen Normalisierung, die bei konstanter Helligkeit eingespart werden könnte, sehr reduziert, da die Korrelation nur in einer Richtung durchgeführt werden muss.

Eine weitere Reduktion des Rechenaufwandes ergibt sich über die bereits beschriebene Bild-Pyramide, wodurch nur in einem kleinen Bereich in horizontaler Richtung die Korrelation durchgeführt werden muss, da die auftretenden Verschiebungen im Bild mit der größten Auflösung klein gehalten werden.

2.3 Erkennung und Separation des Messobjektes

Da die Erkennung einzelner Objekte durch Gruppieren von nahegelegenen Punkten erfolgt, wird die Auswertung der Bewegung verwendet, um ein Zusammenfassen dicht aneinander gelegener Objekte zu vermeiden. Zur Unterscheidung zwischen bewegten und unbewegten Objekten kann die Information aus einer Bildfolge verwendet werden.

Auch für diese Aufgabe sind Methoden des optischen Flusses angebracht, da diese die Abschätzung der Bewegung für jeden Pixel basierend auf der Auswertung einer Zeitreihe erlauben. Die Probleme der unterschiedlich beobachteten Intensitäten und Verdeckungen

kann für den Fall der Identifikation von Bewegungen vernachlässigt werden, da hier nur Bilder einer Kamera ausgewertet werden. Speziell die Verwendung von schnellen Bildraten, die eine Überabtastung der Bewegung ermöglichen, verhindert zu große Bewegungen im Bild und verringert so verschwindende Bereiche, zum Beispiel durch Federn, die sich übereinander schieben.

Der Vergleich jedes Bewegungsvektors mit der stereoskopischen Disparität ermöglicht die Erkennung und Zusammenfassung bewegter Objekte.

Der rote Bereich im rechten Bild von Abbildung 3 zeigt, dass die Bewegung des Flügelpräparats in einer Folge von zwei Bildern richtig erkannt wird. In Bereichen mit gleichmäßiger Textur wird teilweise kein optischer Fluss bestimmt, was als Folge der klein angesetzten lokalen Glättungsterme zu sehen ist. Dadurch wird die Abgrenzung des Flügels zum Hintergrund präziser dargestellt.

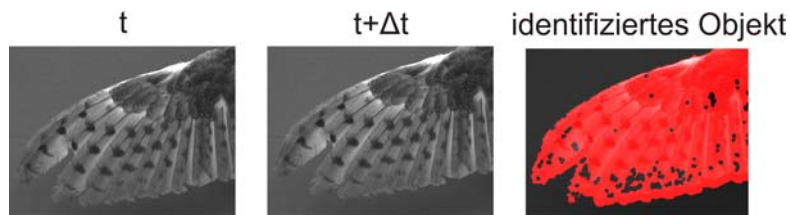


Abb. 3: Erkennung eines bewegten Flügels

3. Genauigkeitsuntersuchungen

3.1 Synthetische Daten

Als ersten Schritt einer Validierung werden synthetische Daten mit zwei Bildanalysemethoden untersucht. Als Ausgangsbild wird hier ein zufälliges Punktmuster verwendet, das häufig in ähnlicher Form auch in der Textur von Vogelflügeln zu finden ist. Die Erzeugung dieser Muster wurde mit Methoden, wie sie in Okamoto et al. [18] beschrieben werden, durchgeführt, wobei keine „out-of-plane“ Bewegung zugelassen wurde. Abbildung 4 und 6 zeigen Gegenüberstellungen der Ergebnisse aus korrelations-basierenden und OF Methoden. Dabei sind die vorgegebenen Verschiebungen („ground truth“) und die Winkelabweichungen der berechneten Verschiebungen als farbkodiertes Bild in Grad [°] für das künstliche Muster bzw. ein reales Muster angegeben.

Abbildung 4 zeigt, dass sich Fehler durch die Interpolation der groben Abfragefenster des Korrelations-Algorithmus speziell in Bereichen mit starken Bewegungsgradienten und am Bildrand ausbilden.

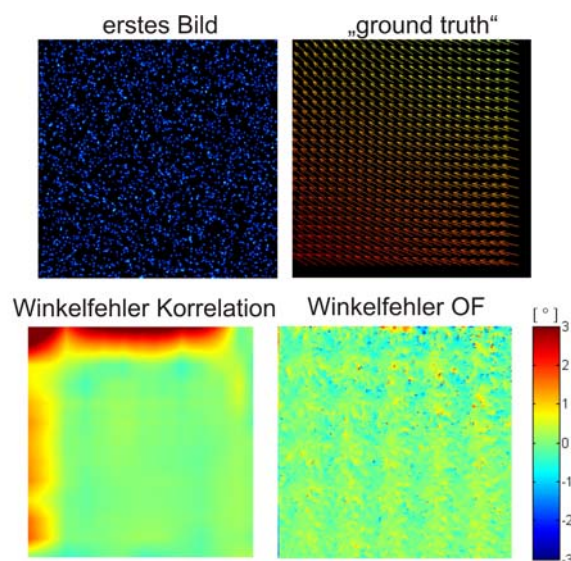


Abb. 4: Validierung mit synthetischen Bildern

3.2 Echte Aufnahmen von realistischen Mustern

Um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Auswertemethoden für reale Aufnahmen zu ermöglichen wurden präzise Verschiebe- und Verdrehmechanismen entwickelt. Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Drehapparats, der eine Rotation des aufgetragenen Musters über einen Hebelarm variabler Länge und eine senkrecht angreifende Mikrometer-Schraube ermöglicht. Die Genauigkeit der eingestellten Verdrehwinkel hängt von der Feineinstellung der Mikrometer-Schraube und der Länge des Hebelarms ab. Ein Hebel von 700mm erlaubt bei einer Mikrometer-Genauigkeit von $1\mu\text{m}$ einen maximalen Winkelfehler von $\pm 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ$.

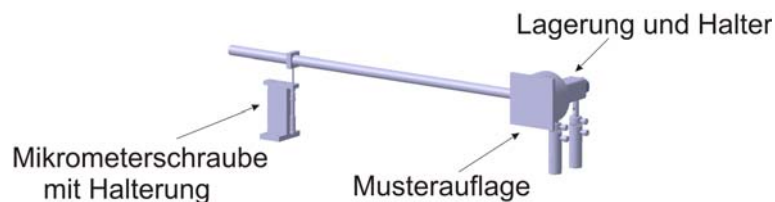


Abb. 5: Apparat zur Erzeugung einer Drehbewegung

Eine unabhängige translatorische Bewegung kann durch einen kommerziellen Präzisions-Verschiebetisch erzeugt werden.

Die Darstellungen in Abbildung 6 vergleichen die Ergebnisse für reale Aufnahmen eines Punktmusters. Durch die Reflektivität der schwarzen Farbe des Hintergrundes ist die Intensität dieser Bereiche höher als im Fall der künstlich erzeugten Bilder. Eine andere Position des Drehzentrums hat veränderte Bewegungsgradienten im Bild zur Folge, wodurch der maximale Fehler der korrelations-basierten Auswertung in anderen Regionen zu finden ist.

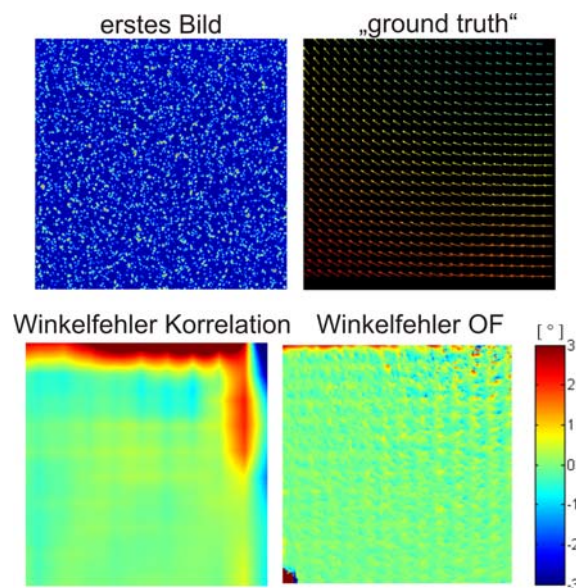


Abb. 6: Validierung mittels realer Aufnahmen eines Punktmusters

3.3 Aufnahmen eines präparierten Eulenflügels

Beide Darstellungen in der unteren Reihe von Abbildung 7 zeigen die Auswertung der Disparitäten im Koordinatensystem des linken Kamerabildes. Ungültige Bereiche (durch Sichtbereich der Kameras, Verdeckungen oder Randeffekte) sind schwarz ausmaskiert. Der verwendete OF Algorithmus nach Ogale und Aloimonos [15] liefert nur gute Ergebnisse in Bereichen mit großem Abstand von den Bildrändern, da sich fehlerhafte Randwerte durch die lokale Glättung ins Bild ausbreiten. Weitere Anpassung der entsprechenden Glättungsparameter und Maskierungen sollten zu einer verbesserten Höhenbestimmung führen.

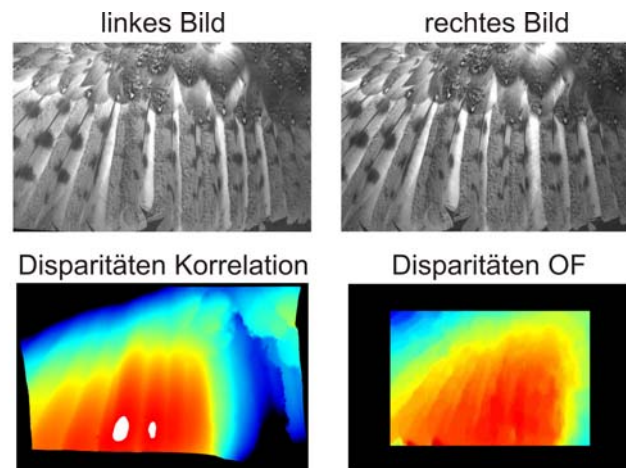


Abb. 7: Bestimmung der Flügelform, oben links: Bild der linken Kamera, oben rechts: Bild der rechten Kamera, unten links: über Korrelation berechnete Höheninformation, unten rechts: über optischen Fluss berechnete Höheninformation.

4. Zusammenfassung

Methoden des optischen Flusses wurden implementiert und an mehreren Bildfolgen verschiedener Abstraktionsstufen bis hin zu echten Aufnahmen eines präparierten Eulenflügels getestet. Zur Validierung wurde der kontrastreiche Flügel mit Mikrometerauflösung verfahren, um eine Verschiebung in aufeinanderfolgenden Bildern zu erzeugen, die mittels OF Methoden ausgewertet werden konnte. Dadurch konnte das Messobjekt erkannt und vom Hintergrund unterschieden werden, wie der rote Bereich in Abbildung 3 zeigt. Der Algorithmus identifiziert keine Bewegungen in Bereichen mit zu kontrastarmer Textur, was aber durch zusätzliche Bildverarbeitung zur Erzeugung einer abgeschlossenen Fläche verbessert werden kann. Weitere Probleme zeigen sich bei bewegten Objekten, die nahe an reflektierenden Oberflächen Schatten erzeugen, deren Bewegung ebenfalls erkannt wird.

Die Bestimmung von Unterschieden in stereoskopischen Bildpaaren ist die aufwändigere Aufgabe, da durch das unterschiedliche Setup der Kameras störende Einflüsse in den Aufnahmen zu bewältigen sind. Durch die Anwendung von OF Methoden auf die Phasenunterschiede in den Bildern ist eine Rekonstruktion der Höheninformation dennoch möglich. Sobald präzise Formdaten des Eulenflügels („ground truth“, zum Beispiel durch einen genauen Laserscanner) vorhanden sind, kann ein Vergleich der Genauigkeiten von korrelations-basierten und OF Methoden durchgeführt werden, um den Vorteil des dichten Verschiebungsfeldes der OF Methoden zu beurteilen.

Dankesworte

Dieses Projekt ist durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Schwerpunktprogramm „Strömungsbeeinflussung in Natur und Technik“ (SPP1207) gefördert.

Der Eulenflügel wurde vom Institut für Biologie 2 an der RWTH Aachen zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [1] M.F. Neef und D. Hummel. Euler solutions for a finite-span flapping wing. In *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications*. Kapitel 19. 2002.
- [2] H. Ohme. Vergleichende Profiluntersuchungen an Vogelflügeln. In *Beiträge zur Vogelkunde*. Band 16, Heft 1/6. 1953.
- [3] W. Nachtigall und J. Wieser. Profilmessungen an Taubenflügeln. In *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*. 52: 333-346. 1966.
- [4] F. Blumrich, A. Schröder, R. Konrath und F. Klinge. Presentation of two optical correlation-based measurement techniques for surface deformation: PROPAC and REPAC. In *Proceedings of Sensor Conference*. II: 117-123. 2007.
- [5] J. Tyson, T. Schmidt und K. Galanulis. Optical Deformation & Strain Measurement in Biomechanics. In *Biophotonics*. 2003.
- [6] R. Fei: Untersuchungen über die Auswertesicherheit bei der Stereo-Particle-Image-Velocimetry. Dissertation, Universität Essen, Shaker-Verlag, Aachen. 2002.
- [7] J. Weng, P. Cohen und M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10): 965-980, 1992.
- [8] R. C. Gonzales und P. Wintz. *Digital image processing*. Addison-Wesley Longman Publishing, Boston, MA, USA, 1987.
- [9] F. Scarano. Iterative image deformation methods in PIV. In *Meas. Sci. Technol.*, 13: R1–R19, 2002.
- [10] B. Horn und B. Schunck. Determining optical flow. In *Artificial Intelligence*, 17:185–203, 1981.
- [11] B. Lucas und T. Kanade: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. In *Proceedings of Image Understanding Workshop*, 1981.
- [12] J. Bigün, G. H. Granlund und J. Wiklund: Multidimensional Orientation Estimation with Applications to Texture Analysis and Optical Flow. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(8): 775-790, 1991.
- [13] D. Scharstein und R. Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, no. 1, pp. 7 – 42, 2002.
- [14] A. S. Ogale und Y. Aloimonos. Shape and the stereo correspondence problem. In *International Journal of Computer Vision*, vol. 65, no. 3, 147-162, 2005.
- [15] A. S. Ogale und Y. Aloimonos. A roadmap to the integration of early visual modules. In *International Journal of Computer Vision: Special Issue on Early Cognitive Vision*, vol. 72, no. 1, 9-25, 2007.
- [16] P. Ruhnau, T. Kohlberger, H. Nobach und C. Schnörr. Variational Optical Flow Estimation for Particle Image Velocimetry. In *Experiments in Fluids*, 38:21-32, 2005.
- [17] P.J. Burt und E.H. Adelson. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. In *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-31, pp. 532-540, 1983.
- [18] K. Okamoto, S. Nishio und T. Kobayashi. Standard images for particle-image velocimetry. In *Meas. Sci. Technol.*, 11:685–691, 2000.