

# 3D SCHWINGUNGSANALYSE MIT HILFE INNOVATIVER BILDKORRELATION

Markus J. Hochrainer, Florian A. Schauer,

Hinweis: in Dokument-Einstellungen-Latex-Vorspann eintragen

**Abstract** – Kurze Zusammenfassung des Projektes, z.B.: Bereits seit einigen Jahren wird ein verstärkter Einsatz von technisch hochwertigen Bildverarbeitungssystemen in der Messdatenerfassung festgestellt. Diese Arbeit zeigt, dass durch ein innovatives Beleuchtungskonzept eine hochdynamische und präzise Auswertung von räumlichen Schwingungen mit Standard-Webcams möglich wird, wenn die tatsächliche Frequenz einer periodischen Schwingung mit Hilfe des Stroboskopeffektes an die geringe Erfassungsrate der verwendeten Kameras angepasst wird. Die räumliche Vermessung und Visualisierung der deformierten Flächen erfolgt durch automatisierte 3D-Stereo-Bildkorrelation. Die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Systems wird durch experimentelle Untersuchungen an elastisch schwingenden Strukturen bestätigt.

**Keywords** – Schlagworte: z.B.: Digitale Bildkorrelation, Stereo-Vision, Stroboskopeffekt, Optische Schwingungsmessung.

## I. EINLEITUNG

Die Erfassung von Strukturschwingungen erfolgt traditionell mit Hilfe von Beschleunigungssensoren, die an genau definierten Positionen auf der Struktur appliziert und mittels experimenteller Modalanalyse ausgewertet werden. Bei diesem anspruchsvollen Analyseverfahren können alle charakteristischen strukturdynamischen Größen (Schwingungsform, Eigenfrequenz und Dämpfung) vollständig ermittelt werden, wobei eine definierte Schwingungsanregung durch Impulshammer oder Shaker erfolgen muss. Ist diese Art der Anregung nicht möglich, kann alternativ eine Betriebsschwingungsanalyse durchgeführt werden, welche die tatsächlichen Schwingungsamplituden in stationären Betriebszuständen erfasst. In jedem Fall verändert das zusätzliche Aufnehmerge wicht und die erforderliche Verkabelung das dynamische Verhalten (mass-loading effect), sodass insbesondere bei leichten platten- oder schalenartigen Strukturen eine rückwirkungsfreie optische Schwingungsmessung erforderlich ist. Dabei kommen meist Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) zum Einsatz, die eine hohe Frequenz- und Amplitudendynamik besitzen und je nach Konfiguration lineare, ebene oder sogar räumliche Deformationen von diskreten

Messpunkten erfassen. Wird die Struktur in einem definierten Raster gescannt, kann daraus für stationäre Schwingungen schrittweise die gesamte Oberflächen-deformation erfasst werden. Andere optische Verfahren erlauben direkt eine räumliche Erfassung der Deformation, etwa Streifenprojektionsverfahren für statische Deformationen [1] oder Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) für die interferometrische Vermessung einer schwingenden Oberfläche [2]. Gut etabliert sind auch digitale Bildkorrelationsverfahren (digital image correlation - DIC), welche für räumliche Analysen mindestens zwei kalibrierte Kameras nutzen, und neben der dynamischen Vermessung von Deformationen auch eine dreidimensionale Rekonstruktion des Messobjektes erlauben [3, 4]. Dabei werden für die optische Vermessung hochdynamischer Szenen derzeit Hochgeschwindigkeitskameras mit entsprechender Auflösung verwendet. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass hochfrequente Schwingungen (Betriebsschwingungsanalyse) bei entsprechender Beleuchtung auch mit Standardkameras oder Webcams vermessen werden können.

## II. THEORIE

Die zentrale Aufgabe klassischer Stereo-Vision liegt in der Bestimmung relativer Tiefeninformation eines Objektes auf Basis von zwei Kamerabildern, welche eine Szene von unterschiedlichen Positionen aus aufzeichnen. Die technische Umsetzung entspricht dabei genau jenem Vorgang, der auch beim räumlichen Sehen stattfindet: ist die Position der Kameras zueinander bekannt und ein punktförmiges Objekt auf beiden Stereobildern erkennbar, kann daraus durch Verschneidung bzw. Bestimmung des kürzesten Abstandes der linken (Index  $l$ ) und rechten (Index  $r$ ) Sichtstrahlen  $s_l$  und  $s_r$  das Objekt im Raum relativ zum Kamera-Koordinatensystem gefunden werden, siehe Fig. 1. ...

...Eine wesentliche Komponente beim vorgestellten Messsystem ist die flächige Beleuchtung des Messobjektes mit Hilfe von Stroboskoplicht, wodurch hochfrequente periodische Schwingungen durch gezielte Verletzung des Abtasttheorems von SHANNON (bewusste Unterabtastung) auf eine niedrige Frequenz abgebildet und an die Erfassungsrate der verwendeten Kameras angepasst werden [5]. Besitzt die tatsächliche mechanische Schwingung die Periodendauer  $T$ , welche mit Hilfe intensiver Stroboskoplichtblitze zu den Zeitpunk-

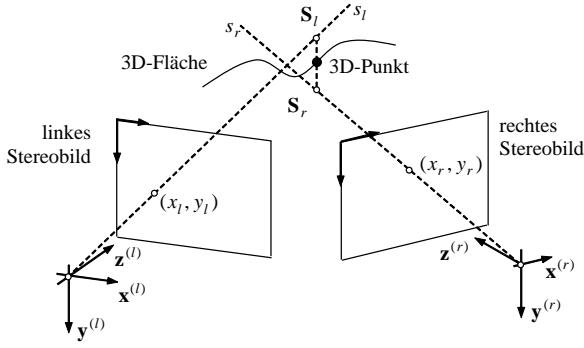


Fig. 1: Prinzip von Stereo-Triangulation.

ten  $nT_S$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  abgetastet wird, so stellt sich unter der Annahme  $T < T_S < 3T/2$  eine scheinbare Schwingung der Periodendauer  $T_d = T_S T / (T_S - T)$  ein.

...Das Zufallsmuster ermöglicht eine eindeutige Zuordnung der Oberflächenpunkte beider Kameras, wobei die korrespondierenden Bildausschnitte für ebene Teilflächen durch die allgemeine Abbildung

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{(1 + a_{11}) x_l + a_{12} y_l + a_{13}}{1 + a_{31} x_l + a_{32} y_l} \\ y_r &= \frac{a_{21} x_l + (1 + a_{22}) y_l + a_{23}}{1 + a_{31} x_l + a_{32} y_l} \end{aligned} \quad (1)$$

verknüpft sind. Dabei beschreiben die Koordinatenpaare  $(x_l, y_l)$  und  $(x_r, y_r)$  die Abbildung eines räumlichen Punktes in der linken und rechten Stereokamera, wobei der linke Kameraausschnitt als Referenzbild festgelegt wurde. Die gesuchten Parameter  $a_{13}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$  beschreiben die Verschiebung, die Dehnung und die Scherung der Referenzfläche in horizontale und vertikale Richtung und sind zur Beschreibung einer affinen Abbildung erforderlich, siehe Fig. 2(b)-(g). Durch die Parameter  $a_{31}$ ,  $a_{32}$  kann eine ...

### III. MESSAUFBAU

Der eingesetzte Messaufbau besteht im Wesentlichen aus zwei Standard-Webcams, die mit Hilfe eines Statives in zueinander definierten Positionen angeordnet und auf die zu untersuchende Szene ausgerichtet sind, siehe Fig. 3. Dabei erfolgt die exakte Ermittlung der relativen Position durch eine Stereo-Vision-Kalibrierung [?] unter Verwendung einer ebenen Kalibrierungstafel mit aufgedrucktem Schachbrettmuster bekannter Dimension. Im Zuge der einmalig durchzuführenden Kalibrierung werden sowohl relative Position und Ausrichtung, als auch Linsenfehler ermittelt bzw. korrigiert. ...

### IV. ANWENDUNGEN

Um die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Systems zu zeigen, ...

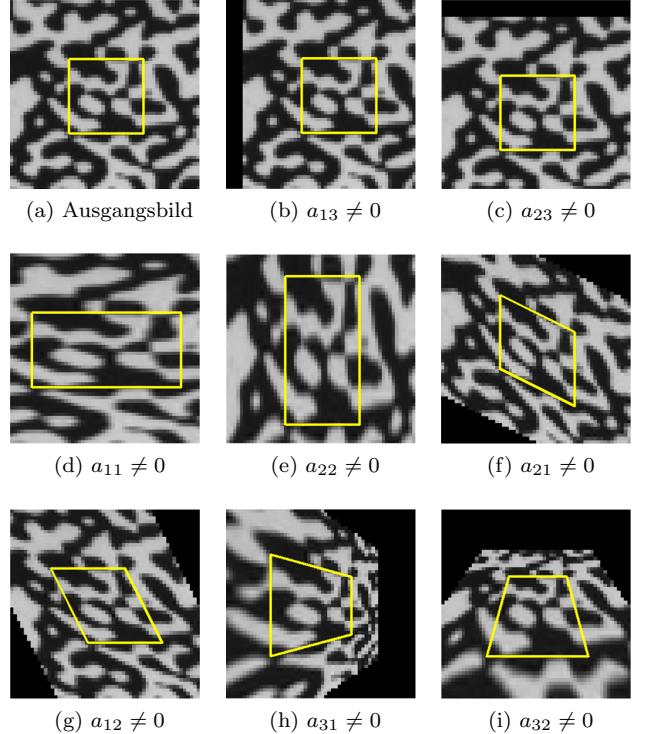


Fig. 2: Einfluss der einzelnen Transformationsparameter auf ein quadratisches Subset.

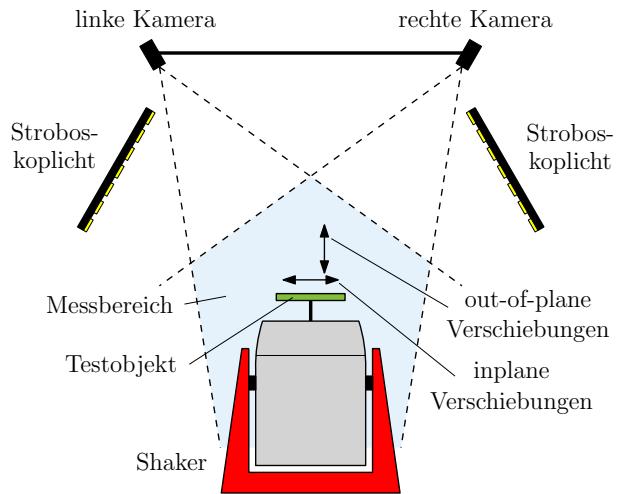


Fig. 3: Schematische Darstellung des Stereo-Messaufbaus.

## LITERATUR

- [1] J. Gühring, *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*, Dissertation, Inst. f. Photogrammetrie, Univ. Stuttgart, 2002.
- [2] D.I. Farrant, J.N. Petzing, J.R. Tyrer, “Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol 41, pp 659–671, 2004.
- [3] M. A. Sutton, J.-J. Orteu, H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer Science, 2009.
- [4] M. N. Helfrick, C. Niezrecki, P. Avitable, T. Schmidt, ”3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement “, *Mech. Systems and Sign. Proc.*, vol 25, pp 917-927, 2011.
- [5] M. J. Hochrainer, “Visualizing Structural Vibrations Using a Novel Strobe Light Setup”, *sound and vibration magazine*, vol 48, pp 14-18, 2014.