

Bildbasierte Vibrationsmessung mittels holografischer Punktvervielfältigung

Simon Hartlieb*, Michael Ringkowski**, Tobias Haist*, Oliver Sawodny**, Wolfgang Osten*

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart

mailto: simon.hartlieb@ito.uni-stuttgart.de

Das in diesem Beitrag vorgestellte bildbasierte Vibrationsmessverfahren nutzt ein holografisches Punktvervielfältigungsverfahren, um die Genauigkeit der Positionsmessung von Punktlichtquellen zu verbessern. Schwingungsamplituden von 100 nm können in einem Feld von 148 mm × 110 mm gemessen werden.

1 Einführung

Im industriellen Umfeld spielt die Messung von Vibrationen, insbesondere im Bereich der Fahrzeugindustrie und des Maschinenbaus, eine bedeutende Rolle. Herkömmliche Methoden wie die Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) ermöglichen eine hochgenaue und schnelle Messung von axialen Vibrationen. Sobald jedoch an mehreren Stellen gleichzeitig die Vibration erfasst werden soll, wird die Umsetzung mit LDVs schnell aufwändig und teuer. Hier bieten bildbasierte Messverfahren eine gute Alternative, da mit ihnen inhärent die Bewegung mehrerer Objekte gleichzeitig gemessen werden kann.

Die Idee des in diesem Beitrag vorgestellten Verfahrens ist es, Punktlichtquellen an einem vibrierenden Objekt anzubringen und deren Bewegung mit einem Kamerasystem zu messen. Um die Positionauflösung, mit der die Position einer Lichtquelle im Bildbereich bestimmt werden kann, zu steigern, wird das Kameraobjektiv um ein computer generiertes Hologramm (CGH) erweitert. Dadurch wird die abgebildete Lichtquelle in der Bildebene zu einem Cluster von N Replikationen der ursprünglichen Intensitätsverteilung vervielfältigt. Bewegt sich das Objekt, bewegen sich alle Replikationen in der Bildebene um denselben Betrag. Durch eine Mittelung der Schwerpunktpositionen aller Replikationen lässt sich die Präzision, mit der die Position in der Bildebene bestimmt werden kann, theoretisch um den Faktor \sqrt{N} verbessern [1]. Dies wurde bereits in mehreren Anwendungen nachgewiesen [2], [3].

2 Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau des Vibrationsmesssystems ist in Abbildung **Fehler! Textmarke nicht definiert.** dargestellt. Um Vibrationen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz zu erzeugen, werden zwei Punktlichtquellen (Roithner LaserTechnik, SMB1N-D630, $\lambda = 630$ nm) an einer Piezo Stage angebracht. Als Referenz wird die Position ebenfalls mit zwei Laser-Doppler-Vibrometern (Polytec NLV 2500) gemessen. Zwei weitere Lichtquellen

sind nicht mit der Stage verbunden, sondern erfahren nur die Umgebungsschwingungen. Alle vier Lichtquellen werden durch ein telezentrisches Objektiv (TZO) (Vico DTCM110-150-AL, NA = 0,0085, $|\beta'| = 0,11$) auf eine Hochgeschwindigkeitskamera (Mikrotron EoSens 4CXP, 4 MPix, 563 fps) abgebildet. In der Blendenebene des TZO ist das CGH zur Punktvervielfältigung angebracht. Das Sichtfeld des Messsystems beträgt 148 mm × 110 mm.

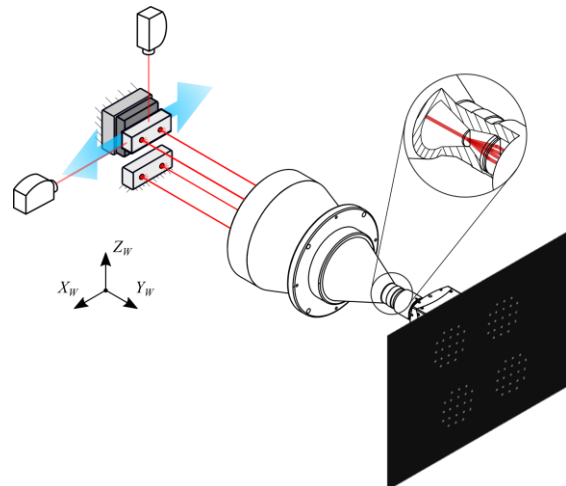


Abb. 1 Experimenteller Aufbau. Vier Lichtquellen werden von einem TZO auf eine Kamera abgebildet. Zwei Quellen werden mit einer Piezo-Stage bewegt. Die Bewegung wird mit zwei LDVs als Referenz gemessen. Die Lichtquellen werden durch ein CGH in ein Spotmuster repliziert.

3 Messungen und Ergebnisse

Um zu untersuchen, welche kleinsten Schwingungsamplituden mit dem Messsystem noch auflösbar sind, wird eine Schwingung von 50 Hz mit der Piezo Stage, deren Amplitude von 500 nm auf 70 nm abnimmt, erzeugt. Die Auswertung zeigt, dass eine Amplitude von 100 nm mit dem Kamerasystem eindeutig messbar ist. In Abb. 2 wird eine Schwingung von 50 Hz und einer Amplitude von 100 nm erzeugt und sowohl von dem Kamerasystem (blau) als auch dem LDV (grau) als

Referenz gemessen. Beide Signale sind hochpassgefiltert (30 Hz Grenzfrequenz), um niederfrequente Schwingungen der Umgebung zu unterdrücken.

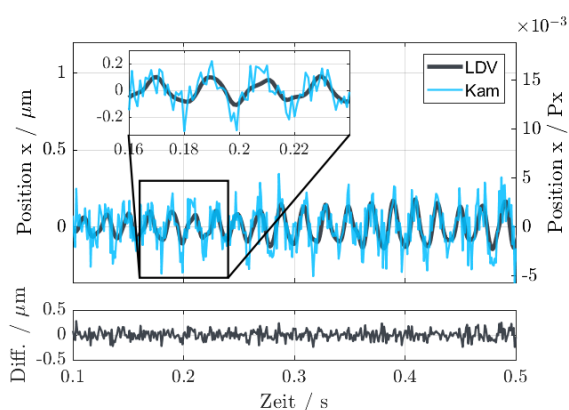


Abb. 2 Messung einer 50 Hz Schwingung mit einer Amplitude von 100 nm durch das vorgestellte Kamerasystem und ein LDV als Referenz. Im unteren Diagramm ist die Differenz zwischen beiden Signalen dargestellt.

Eine Auflösung von 100 nm ergibt mit der größten Messlänge von 148 mm einen Dynamikbereich von 1480000:1. Das untere Diagramm in Abb. 2 zeigt die Differenz beider Signale zueinander. Die Standardabweichung des Differenzsignals beträgt $\sigma_d = 0,095 \mu\text{m}$, was $\sigma_d = 0,0015$ Pixel entspricht.

Ein grundsätzliches Problem von Vibrationsmessungen ist die Präsenz von Umgebungsschwingungen, die dem eigentlichen Signal überlagert sind und sowohl auf das Objekt als auch auf das Messsystem wirken. Die klassisch verwendete Frequenzfilterung funktioniert nur, solange das Signal und die Umgebungsschwingungen spektral getrennt sind. Falls nicht, bietet die nachfolgende Methode eine Möglichkeit, das Signal trotzdem messen zu können. Sie basiert darauf, durch Differenzbildung die Umgebungsschwingungen zu unterdrücken. Hierzu wird die Relativposition zwischen den zwei statischen und den zwei bewegten Lichtquellen aus Abb. 1 gebildet. Die statischen Lichtquellen sind nur den Umgebungsschwingungen ausgesetzt, wohingegen die am Aktor befestigten sowohl den Umgebungs- als auch dem Messsignal unterliegen. Die Idee ist, dass durch Differenzbildung nur noch das Messsignal übrig bleibt. Dies wurde für eine Schwingung mit 50 Hz und einer Amplitude von 100 nm untersucht. In Abb. 3 ist das Spektrum für die Absolutposition eines aktiv bewegten Clusters (Mitte), für das LDV (unten) und für die Relativposition zwischen bewegten und statischen Clustern gezeigt. Sowohl im Spektrum der absoluten Position als auch in dem des LDV sind die Umgebungsschwingungen mit den Frequenzspitzen bei 10,4 Hz, 16,2 Hz und 22,1 Hz sichtbar. Für die Relativposition sind die Umgebungsschwingungen nahezu vollständig kompensiert.

Weitere Details zu den durchgeführten Experimenten finden sich in [4].

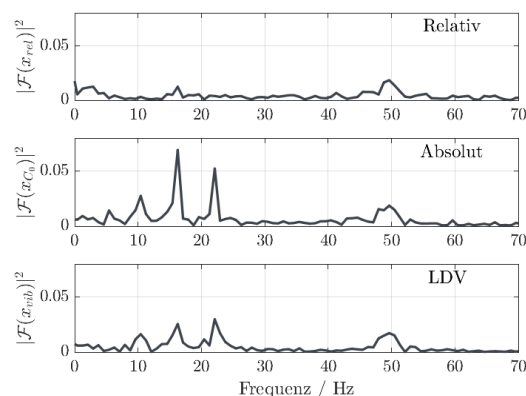


Abb. 3 Schwingungsmessung mit 50 Hz und 100 nm Amplitude. Oben: Spektrum der Relativposition zwischen statischen und bewegten Lichtquellen; Mitte: Spektrum der Absolutposition eines bewegten Clusters; Unten: Spektrum des LDV.

4 Zusammenfassung

Es wurde experimentell gezeigt, dass durch die Nutzung eines CGH zur Vervielfältigung einer einzelnen Lichtquelle zu einem Cluster an Spots in der Bildebene, Vibrationen einer Lichtquelle mit einer Auflösung von 100 nm gemessen werden können. Das Messfeld des vorgestellten Aufbaus beträgt 148 mm × 110 mm, woraus sich ein Dynamikbereich von 1480000:1 ergibt. Zur Referenzmessung wird ein kommerziell erhältliches LDV genutzt. Weiterhin wurde gezeigt, dass sich Umgebungsschwingungen durch eine Differenzbildung zwischen einer statischen und einer bewegten Lichtquelle kompensieren lassen.

Die Vorteile des vorgestellten Messsystems liegen in dem einfachen und kostengünstigen Aufbau, der hohen Auflösung und der Möglichkeit, Relativmessungen zwischen mehreren Objekten durchführen zu können. Nachteilig ist die erforderliche Anbringung von aktiv leuchtenden Markern am Messobjekt und die geringe Messrate konventioneller Kameras.

Literatur

- [1] T. Haist, „Multi-image position detection“ in: *Optics Express* 14450, Vol. 22, No. 12 (2014)
- [2] S. Hartlieb, „Hochgenaue Kalibrierung eines holografischen Multi-Punkt Positionsmesssystems“ in: *tm – Technisches Messen*, Band 87, Heft 7-8 (2019)
- [3] S. Hartlieb, „Highly accurate imaging based position measurement using holographic point replication“ in: *Measurement*, Vol 172 (2021)
- [4] S. Hartlieb, „Multi-positional image-based vibration measurement by holographic image replication“ Accepted for pub. in: *Light: Advanced Manufacturing* (2022)