

Kombination von Stereoskopie und digitalen Korrelationsverfahren zur Messung von Kontur, Verformung und Dehnung

Hubert W. Schreier, Ralf Lichtenberger

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden neben den Grundlagen zur flächenhaften dreidimensionalen Verformungsmessung mittels Korrelationsverfahren zwei Ansätze zur Verbesserung der Auswertemethoden beschrieben. Durch die Einbeziehung von Nachbarschaftsinformationen und prädiktiven Methoden können lokal variante Dehnungsfelder und auch sehr große Dehnungen automatisch bestimmt werden.

Einführung

Korrelationsverfahren zur 2D-Verformungsmessung

Die Bestimmung von Objektverformungen mittels digitalen Korrelationsverfahren basiert auf der Idee ein Muster (Speckle) auf der Objektoberfläche in aufgenommenen Bildern zu verfolgen. Abb. 1 zeigt die Oberfläche eines Objektes zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Entsprechend der Objektverformung wird das Oberflächenmuster im schwarz eingezeichneten Korrelationsfenster (Subset) verschoben und verformt. Die Verschiebung und Dehnung an jedem Bildpunkt wird durch Einbeziehung der Pixel in einem Subset berechnet. Ein *Ähnlichkeitsmaß* wird zur Berechnung der besten Anpassung an das Grauwertmuster des Referenzbildes definiert.

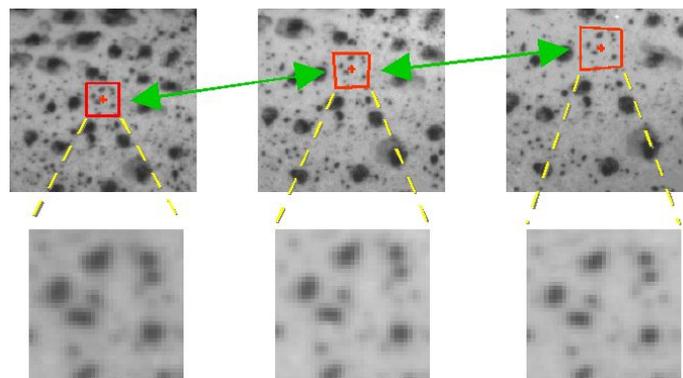


Abb. 1: Objektaufnahmen zu drei verschiedenen Zeitpunkten bzw. Verformungszuständen. Das Muster im Subset wird verschoben und gedehnt.

Aus der Berechnung der Verschiebung für jeden Bildpunkt resultiert das flächenhafte Verschiebungsvektorfeld wie in Abb. 2 gezeigt.

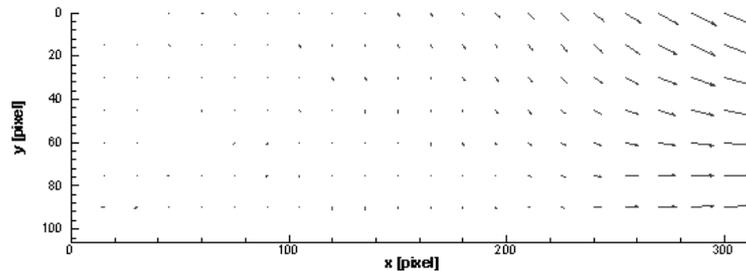


Abb. 2: Das Verschiebungsvektorfeld einer Zugprobe die horizontal gedehnt wurde. Die Vektoren auf der rechten Seite verdeutlichen das Einschnüren der Probe.

Iteratives Korrelationsverfahren

Das Ähnlichkeitsmaß C wird dazu verwendet die beste Anpassung an das Grauwertmuster zu bestimmen und kann als Funktion von den Verschiebungen u, v und deren Richtungsableitungen ausgedrückt werden:

$$C = f(u, v, du/dx, du/dy, dv/dx, dv/dy) \quad (1)$$

Die Bestimmung der besten Anpassung an das Grauwertmuster erfolgt durch iterative Optimierung des Ähnlichkeitsmaßes C . Folgende Rechenschritte werden dabei für jedes Subset durchgeführt:

1. Berechnung der Kreuzkorrelation und der Ableitungen an einem Punkt
2. Variation des Parameterraumes mit numerischen Verfahren (Newton-Raphson, Marquardt-Levenberg)
3. Subpixel-Genauigkeit wird erreicht durch Grauwert-Interpolation
4. Wiederholung der Schritte 1-3 bis die Konvergenzbedingungen erfüllt sind.

Da die Subsetdeformation durch die Ableitungsterme (Gleichung 1) bei der iterativen Berechnung mit berücksichtigt ist, kann mit diesem Ansatz im Gegensatz zu anderen Methoden (wie z.B. der Fouriertransformations-Methoden zur Mustererkennung) komplexe lokalen Objektverformungen wie

1. Größenänderung
2. Rotation und
3. Scherung

zuverlässig bestimmt werden:

Einbeziehung der Umgebungsinformation und Prädiktion

Wie auch bei anderen Ansätzen zur Verschiebungsbestimmung ist der Konvergenzbereich des iterativen Korrelationsverfahrens nur einige Bildpunkte groß, d.h. Bei größeren

Verschiebungen wird evtl. keine Konvergenz erreicht und es müsste manuell für einen Pixel eines Bildes ein Startwert vorgegeben werden. Mit den folgenden zwei Ansätzen kann auch bei lokal unterschiedlichen und bei sehr großen Verschiebungen eine zuverlässige automatische Auswertung einer Bildserie erreicht werden:

1. **Einbeziehung der Umgebungsinformation:** Ausgehend von Bildbereichen mit geringer Verschiebung werden die Parameter (u , v , du/dx , du/dy , dv/dx , dv/dy) der Nachbarsubsets bei der Korrelation vorgesetzt.
2. **Prädiktive Methoden:** Durch Berücksichtigung der örtlichen und zeitlichen Ausbreitung von Verschiebungen werden mittels prädiktiver Methoden (Extrapolation, Kalmanfilter) die Parameter (u , v , du/dx , du/dy , dv/dx , dv/dy) der Subsets bei der Korrelation vorgesetzt.

Abb. 3 zeigt das Meßergebnis einer stark verformten Kunststoff-Probe. Durch eine ausreichend hohe zeitliche Abtastung (Framerate) kann mit den eingesetzten prädiktiven Methoden eine automatische Auswertung bei sehr großen Verschiebungen und Dehnungen erreicht werden.

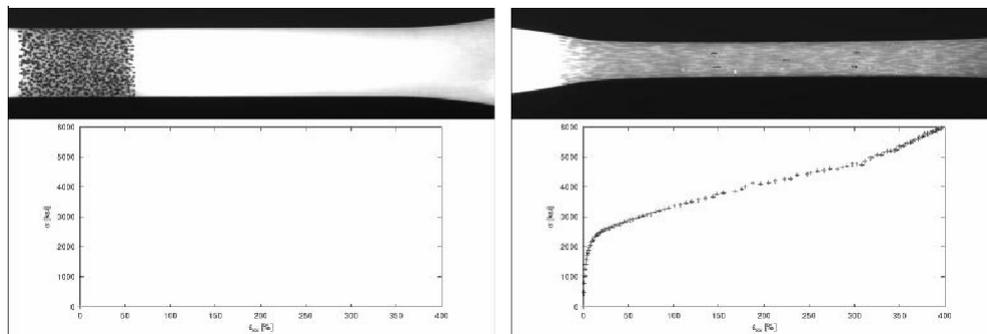


Abb. 3: Erstes und letztes Bild einer automatisch ausgewertete Bildsequenz: Zugprobe aus HDPE mit einer Dehnung bis 400%.

Berechnung der Dehnung

Zur Berechnung der lokalen Dehnungen aus den Verschiebungsvektorfeldern kann der Lagrangsche Ansatz verwendet werden. Dabei müssen die Gradienten des Verschiebungsfeldes bestimmt werden. Die Ableitungen werden mit einem lokalen Polynomfit berechnet:

$$u(x, y) = u_0 + u_x x + u_y y \quad (2)$$

$$v(x, y) = v_0 + v_x x + v_y y \quad (3)$$

Aus diesen Ableitungen wird der Lagrangsche Dehnungstensor berechnet:

$$\varepsilon_{xx} = u_x + 0.5(u_x^2 + v_x^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{yy} = v_y + 0.5(u_y^2 + v_y^2) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xy} = 0.5(u_y + v_x) \quad (6)$$

Aufbau des 3D-Meßsystems

Wie in Abb. 4 gezeigt erfordert die dreidimensionale Verformungsmessung die Verwendung einer zweiten Kamera nach dem stereoskopischen Prinzip.

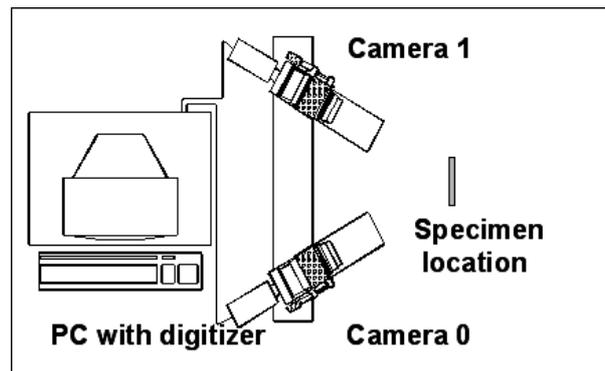


Abb. 4: Stereoskopisches Prinzip zur 3D-Verformungsmessung bestehend aus 2 Kameras mit unterschiedlichen Orientierungen.

Bei einer Kalibrierung des Systems mittels Bündelausgleichsverfahren werden Orientierung und Abstand der Kameras und die Objektivparameter wie Brennweite und Verzeichnungen bis zu höheren Ordnungen berechnet. Abb. 5 zeigt eine stereoskopische Aufnahme des Kalibrierobjektes.

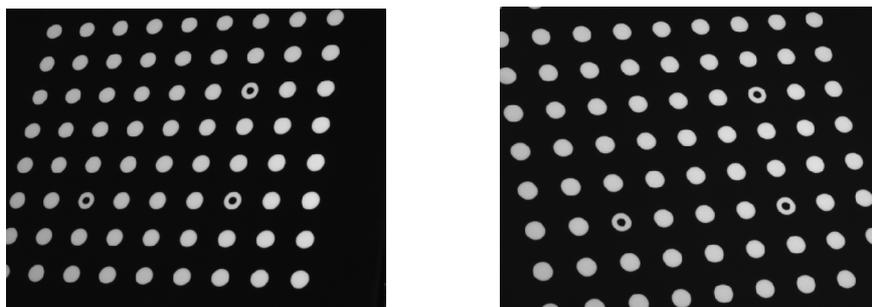


Abb. 5: Linkes und rechtes Kamerabild des Kalibrierobjektes.

Zur Auswertung der Kamerabilder wird zunächst die Korrelation der beiden stereoskopischen Bilder eines Verformungszustand durchgeführt. (Abb. 6 Bilder übereinander) Daraus wird z.B. die Kontur des Objektes berechnet.

Die Berechnung der Verschiebungen erfolgt aus Korrelationen der Bilder unterschiedlicher Verformungszustände getrennt für jede Kamera. (Abb. 6 Bilder nebeneinander) Aus den Verschiebungen werden die Dehnungen über den Lagrangschen Ansatz berechnet.

Durch den Vergleich aller möglichen Korrelationen in Abb. 6 ist es möglich die Genauigkeit (Standardabweichung) der Messung zu berechnen.

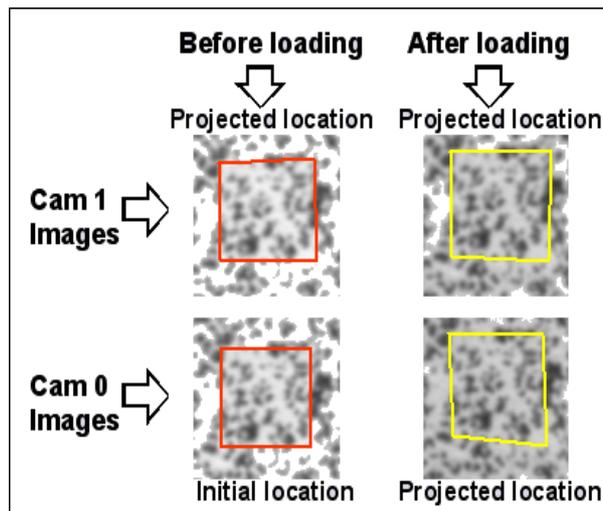


Abb. 6: Kamerabilder die zur Korrelation benutzt werden.

Ergebnisse

Kontur

Zur Demonstration der Tiefenauflösung wurde ein Specklebild auf zwei Blatt Papier (300x200mm) ausgedruckt. Auf eine Plexiglasscheibe wurde eines der beiden Papierblätter und darauf die, aus dem zweiten Papierstück, ausgeschnittene Kontur einer Ente aufgeklebt. Abb. 7 zeigt das Ergebnis der Konturmessung. Die papierdicke (ca. 1/10mm) Ente hebt sich von der leicht gekrümmten Plexiglasscheibe ab. Der Anzeigebereich für die z-Komponente beträgt -0,37 bis +0,12mm.

Verschiebung

An einem PKW-Karosserieteil wurde ein Steinschlag simuliert. Abb. 8 zeigt die Verschiebungskomponente parallel zur Oberflächennormale bei einem Messfeld von ca. 200x150mm. Die *Out-Of-Plane*-Verschiebung beträgt 0,55mm.

Dehnung

Die Bestimmung der Dehnung wird an 2 Beispielen gezeigt:

1. Eine allseitig eingespannte Gummimembran, die durch Innendruck gedehnt wurde. In Abb. 9 ist die Dehnungskomponente ε_{yy} eingezeichnet.
2. Eine Zugprobe aus Stahl: Abb. 10 oben zeigt die Dehnungskomponenten längs der Zugrichtung und Abb. 10 unten quer zur Zugrichtung.

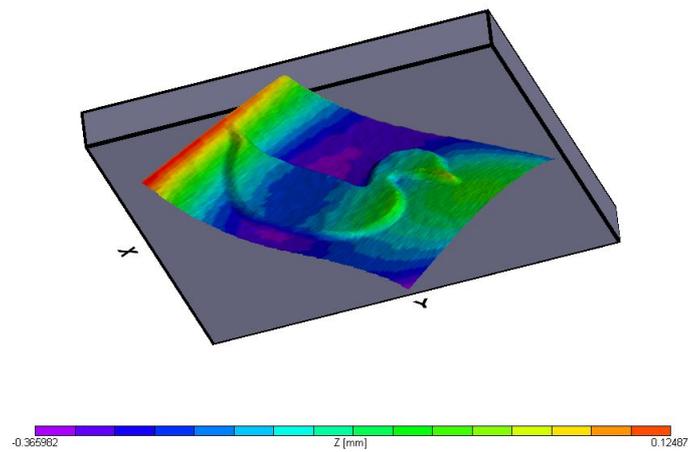


Abb. 7: Konturmessung: Papierdicke Ente auf einer leicht gebogenen Plexiglasscheibe.

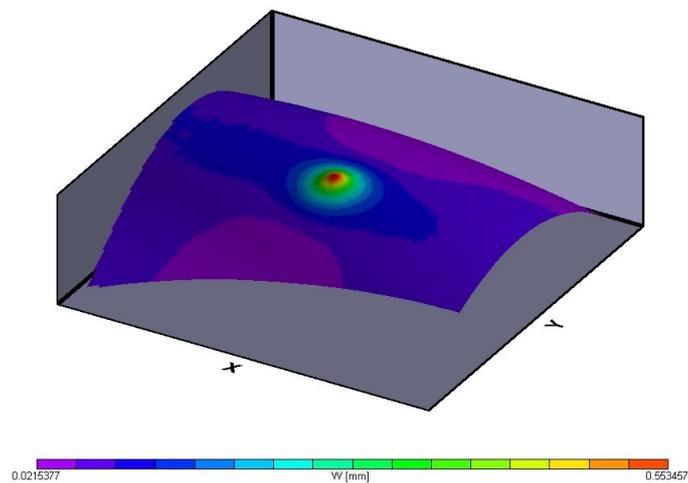


Abb. 8: Verschiebungsbestimmung: Steinschlagdelle in einem KFZ-Blech.

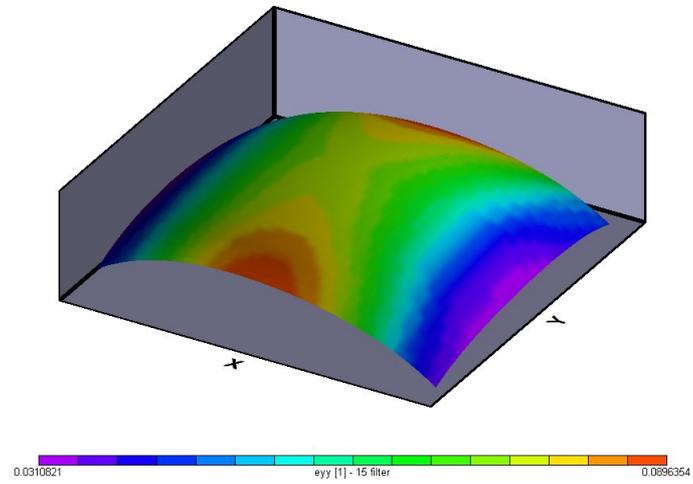


Abb. 9: Dehnungsbestimmung bei einer Gummimembran.

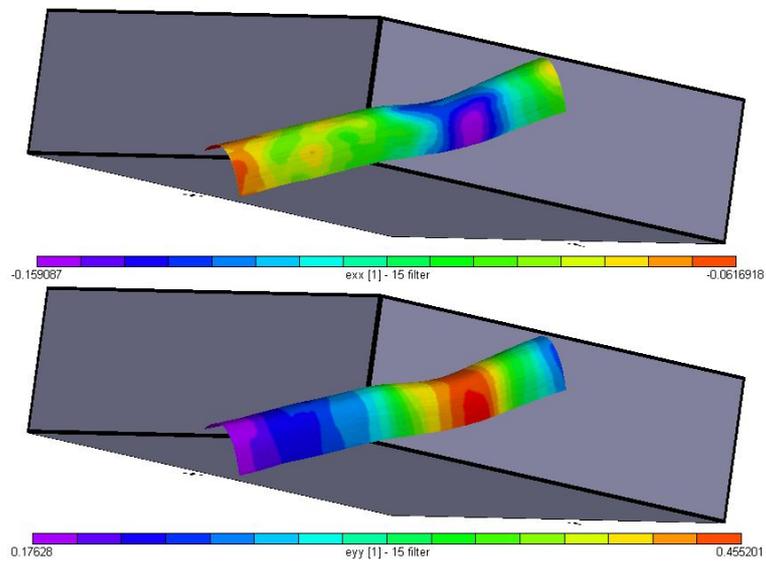


Abb. 10: Dehnungsbestimmung bei einer Zugprobe aus Stahl.

Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur berührungslosen und flächenhaften Messung von Kontur und der dreidimensionalen Verschiebung und Dehnung vorgestellt. Das Verfahren ist beliebig skalierbar für Messfelder von wenigen Millimetern bis zu mehreren Metern Größe. Die Meßgenauigkeit ist unabhängig von großen Rotationen und Verschiebungen. Die erreichbare Genauigkeit beträgt bis zu $\pm 0,01$ Pixel, d.h. bis zu ca. 200 microstrains für Dehnungen. Durch Verwendung von Algorithmen zur Umgebungsberücksichtigung und mittels prädiktiver Methoden können Dehnung bis zu 500% zuverlässig gemessen werden. Abhängig von den verwendeten Kameras können Quasi-Statische bis zu Ultra-High-Speed Ereignisse betrachtet werden. Durch die einfache und robuste Kalibrierung und Auswertung ist das System auch ohne Spezialkenntnisse in einem weiten Bereich einsetzbar.

Literatur

- Peters, W.H. and Ransom, W.F., *Digital imaging techniques in experimental stress analysis*, Opt. Eng., 21(3), pp. 427-431, 1992
- Helm, J.D., McNeill, S.R. and Sutton, M.A., *Improved 3-D image correlation for surface displacement measurement*, Opt. Eng., 35(7), pp. 1911-1920, 1996
- Sutton, M.A., Cheng, M., Peters, W.H., Chao, Y.J. and McNeill, S.R., *Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis*, Image and Vision Computing, 4(3), pp. 143-151, 1986
- Synnergren, P. and Sjoedahl, M., *A stereoscopic digital speckle photography system for 3-d displacement field measurements*, Optics and Lasers in Engineering, 31, pp. 425-433, 1999