

FREE-FORM DEFORMATION METHOD IN THE EVALUATION OF THE DISPLACEMENT FIELD FOR ORTHOTROPIC MATERIALS

Katalin HARANGUS¹

ABSTRACT:

IN THIS PAPER A NON-DESTRUCTIVE INVESTIGATION METHOD IS PROPOSED TO DETERMINE THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ORTHOTROPIC MATERIAL, IN THIS CASE THE MASSIVE WOOD. DURING THE RESEARCH, DIFFERENT TYPES OF SPECIMENS WERE ANALYZED IN THE FORM OF A DISC SHAPE WITH 80 [MM] DIAMETER. THE DISC WAS ROTATED SO THAT THE FIBERS ORIENTATION CLOSES IN 150 LINE ANGLES WITH THE VERTICAL AXE DIRECTION. THE IMAGE REGISTRATION TECHNIQUE WAS APPLIED AS INVESTIGATION METHOD, IN WHICH THE FREE-FORM ALGORITHM WAS APPLIED AS INTERPOLATION STRATEGY. THE SOFTWARE OFFERS THE POSSIBILITY TO DETERMINE PLANE STATE DEFORMATION WITHOUT THE SOLID MOVEMENTS.

KEY WORDS: FREE-FORM DEFORMATIONS, IMAGE REGISTRATION, DISPLACEMENT FIELD, SPECIFIC STRAINS, ORTHOTROPIC MATERIAL

EINLEITUNG

Dieses Verfahren umfasst im Allgemeinen zwei Arten der Bildaufzeichnung: eine davon bezieht sich auf das Quellbild und wird durch $S : \Omega_s \subset R^d \mapsto R$ bezeichnet, die andere bezieht sich auf das Zielbild und wird durch $T : \Omega_T \subset R^d \mapsto R$, $d = \{2,3\}$ bezeichnet. Das Zielbild wird einer Transformation unterworfen: $F : \Omega_s \mapsto R^d$.

¹ Doktorand, Universität „Transilvania“ aus Braşov (Kronstadt), Fakultäten für Maschinenbau, email: katalin@ms.sapientia.ro

Ziel der Registrierung ist die Schätzung der optimalen Verwandlung. Dies ist meist durch ein Minimierungsproblem der Energie erreicht:

$$\arg \min_{\theta} M(T, S \circ F(\theta)) + R(F(\theta)). \quad (1)$$

Die Gleichung (1) umfasst zwei Ausdrücke. Der erste, genannt M , quantifiziert die Steuerung zwischen das Zielbild T und das Quellebild S unter dem Einfluß der Transformation F , parametrisiert von θ . Die Schreibweise $S \circ F$ wird alternativ durch $S \circ u$ notiert. Damit wird angezeigt dass wenn man das Bild bewegt, diese wird sich auch verformen. Der zweite Ausdruck, genannt R , regelt die Verwandlung und die Ursachen der falschen Formulierung des Problems. Allgemeiner weise, in jeder $x \in \Omega$ (Ω stellt das Bildbereich dar) Position, wird die Verwandlung durch $F(x) = x + u(x)$ gegeben, wo u die Verformungsfeld ist. Das Geschwindigkeitsfeld wird durch v bezeichnet.

Die Registrierung des Bildes ist ein Verfahren der in den letzten Jahrzehnten untersucht und im Detail erforscht wurde. Dieses Verfahren umfasst drei Hauptkomponenten²:

1. Verformungsmodellen,
2. objektive Funktionen, und
3. Optimierungsstrategien.

Die Wahl eines entsprechenden Verformungsmodells in dem Aufnahmeprozess ist deswegen sehr wichtig, weil dieser eine Kompromiss zwischen der Präsentation von der Bildern und Recheneffizienz bezieht. In derselbe Zeit, die Verformungsmodell spiegelt die Art der Umwandlung dar. Dieses Modell ist Akzeptabel und beschränkt weitgehend die Lösung. Die Parameter der die Schätzung durch die Optimierungsstrategie registriert, entspricht der Freiheitsgrad des Verformungsmodells. Die Zahl dieser Parameter ist sehr unterschiedlich, bzw. von Zehn (in Falle der globalen-linearen Transformationen) bis zu Millionen (wen die Verformungen als nicht-parametrisch betrachtet werden).

In die Klassifizierung der Verformungsmodellen, eine Hauptkategorie in der Transformation von geometrischen Formen sind die Modellen inspiriert entweder aus der Theorie der Interpolation oder aus der Theorie der Annäherung³. In der Theorie der Interpolation, die Bewegungen aus einer definierten Bereich aus dem Bild werden als bekannt betrachtet. Diese Bewegungen werden dann für das ganze Bild durch Interpolation

² Sotiras, A., Davatzikos, C., Paragios, N., "Deformable Medical Image Registration: A Survey", *RR-7919, INRIA* (2012): 6.

³ Holden, M., "A review of geometric transformations for nonrigid body registration", *Medical Imaging IEEE Transactions* 27 (2008): 111-128.

ermittelt. In die Theorie der Annäherung wird es angenommen, dass es bei der Schätzung der Verschiebung ein Fehler unterliegt. Dadurch wird diese Verwandlung die bekannten Bewegungen leichter schätzen als wenn man die genauen Werte dieser berücksichtigen würde. Der Erfolg dieser Modelle liegt daran, dass diese ausreichend entwickelt sind um die Änderungen, dass in der Bildregistrierung mit niedrigen Freiheitsgradeaus auftreten, zu beschreiben. Dadurch wird der Abzug der Parameter erleichtert.

Eine der wichtigsten Strategien der Interpolation sind die „free-form“ Verformungen.

DIGITALE BILDANALYSE

Ziel der Untersuchung war es, ein Programm der Bildverarbeitung zu erstellen für die Bestimmung des Verformungsfeldes der orthotropen Materialien. In diesem Fall geht es um Massivholz in der Form einer Scheibe. Die Strategie der Bildverarbeitung basiert sich auf die „free-form“ Verformungsmodellen.

Die „free-form“ Verformungen (Free-Form Deformation - FFD) ist eine wichtige Transformationsmethode des geometrischen Formen. Diese Methode wurde umfassend untersucht für die Durchführung der Animation und geometrische Modellierung auf dem Computer. Der ursprüngliche Ansatz⁴, bzw. die Nachfolgende, beinhaltet die Einbindung eines Gegenstandsmodells im einen Volumen dessen Form durch die Bewegung der Steuerpunkte geendet werden kann.

Wir können sagen, dass die „free-form“ Verformungen zu den am häufigsten verwendeten Arten der Transformationsmodellen in die Bildverarbeitung gehören. Ein rechteckiges Raster $G = K \times L$ wird auf ein Bild mit einer Größe von $M \times N$, $K \ll M, L \ll N$ überlappt. Dieses Bild ist unter dem Einfluss der Kontrollpunkte entstanden. Die Verformung ist das Ergebnis von der Zusammenfassung der Tensor-Produkte des univariate Splinekurven.

2D-Verformung sind wie folgt definiert

$$u(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L B_k(\mu) B_l(\nu) d_{kl}, \quad (2)$$

wobei d die Bewegung ist, $k = \lfloor x / \delta_x \rfloor$, $l = \lfloor y / \delta_y \rfloor$, $\mu = x / \delta_x - \lfloor x / \delta_x \rfloor$ und $\nu = y / \delta_y - \lfloor y / \delta_y \rfloor$. B_l die Grundfunktion der l Ordnung des B-Spline-Kurven, wobei

⁴ Sederberg, T.W., Parry, S.R., "Free-form deformation of solid geometric models" *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20 (1986): 151-160.

$\delta_x = M / (K - 1)$ und $\delta_y = N / (L - 1)$ die Abstand der Kontrollpunkte. Der Vorteil des Transformationsmodells liegt in seine Einfachheit, Ebenheit, in seiner Effizienz bzw. Kapazität die lokale Verformung zu beschreiben mit nur wenigen Freiheitsgraden.

FFD wurde zuerst in die computerunterstützte Grafik⁵ verbreitet, aber mit der Zeit, hat sich eine breite Anwendung in der medizinischen Bildgebung gewonnen, besonders wenn diese mit dem kubischen B-Spline-Kurven⁶ gekoppelt wurden.

In den folgenden Zeilen werden die Phasen der Bildverarbeitung vorgelegt durch den das Verformungsfeld bestimmt wird.

In die erste Phase wird die durchschnittliche Pixelintensität des analysierten Objekts stabilisiert, damit werden die Bilder verschärft.

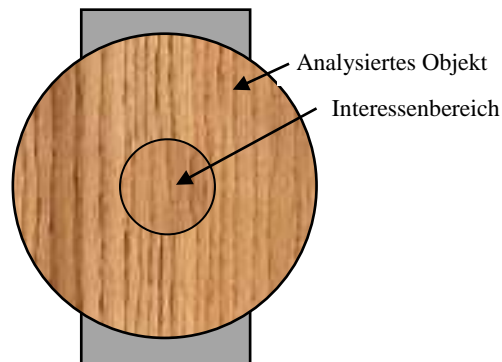


Abb. 1 Testbereich

In die zweite Phase wird ein einheitliches Netz der Anfangsbildes definiert f_0 , mit 40x40 Netzwerkpunkte, in solche weise, dass die Mitte der Netzwerks mit die Mitte der erforschter Objekts übereinstimmt (Abb. 1.). Der Abstand zwischen zwei Punkten der Netzwerks soll 20 Pixel sein, dass entspricht 0,635 mm. In die nächsten Bilder f_i werden die besten Positionen entsprechend jedem Punkt aus dem Netzwerk approximiert. Dieses Approximationsalgorithmus kann nicht ganzzahligen Koordinaten produzieren. Um die Pixelintensität in die nicht ganzzahligen Koordinaten zu erzeugen wird das bilineare Interpolationsverfahren verwendet. Aufgrund dieses Algorithmus wird eine Annäherung auf zwei hierarchischen Ebenen durchgeführt. Erstens wird die Verformung mit einer Genauigkeit von 0,5 Pixeln bestimmt. Zweitens, durch die verfeinerte Auflösung, wird

⁵ Hsu, W., Hughes, J., Kaufman, H., "Direct manipulation of free-form deformations", *ACM Siggraph Computer Graphics*, 2 (1992): 177-184.

⁶ Rueckert, D., Aljabar, P., Heckemann, R.A., Hajnal, J.V., Hammers, A., "Diffeomorphic registration using B-splines", *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI'06*. 2 (2006): 702-9.

eine Genauigkeit von 0,02 Pixeln erreicht. Als Folge, die Verformung in jeder Punkt des Netzwerks wird in Einheiten von 0,635 μm bestimmt. Für jedes verformtes Bild aus jedem Netzwerkpunkt wird die geschätzte Verformung gespeichert.

Die geschätzte Verformung im Falle einer Pixel (x, y) aus dem verformten Bild, wird durch die folgende Formel gegeben:

$$\arg \min_{(dx, dy)} \sum_{p=-s}^s \sum_{q=-s}^s (F_0(x+p, y+q) - F_i(x+p+dx, y+q+dy))^2, \quad (3)$$

mit $|dx| < w$ und $|dy| < w$,

wo, F_0 und F_i sind die vergrößerte Versionen der primären Bilder f_0 bzw. f_i ; w ist die maximale Verformung, groß genug um alle aktuellen Verformungen abzudecken; s ist der untersuchte Bereich rund um einen Pixel (x, y) während der Suche nach der besten Übereinstimmung.

In der letzten Phase, um die Verformungen aufgrund der erhöhten Druckkräfte zu studieren, wird die Rekonstruktion der Bahn der Gitterpunkte vorgenommen. Die Verformungen werden angesichts des Mittelpunkts des Netzwerks (Bezugspunkts) berechnet, der während der Analyse als dasselbe betrachtet wird.

MATERIALIEN UND METHODEN

Für Mustermaterialien wurden identische Proben aus verschiedenen Holzarten hergestellt. Diese Muster wurden parallel zu den Holzfasern geschnitten, in Form von Scheiben mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Dicke von 10 mm. Die Musteroberflächen wurden zuerst mit weißer Farbe vollflächig lackiert, dann nochmal mit schwarzer Farbe bespritzt. Durch dieses Bespritzen werden schwarze Farbflächen von unterschiedlichen Größen und Form erhalten mit einer Zufallsverteilung. Dank des weißen Hintergrunds, ergibt sich eine Oberfläche mit einem sehr guten Kontrast wodurch eine spätere, einfache Identifizierung der schwarzen Punkte möglich wird.

Um eine möglichst genaue Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von orthotropen Materialien aus Holz zu erreichen wurde ein Prüfstand entworfen und gebaut. Dieser

Prüfstand dient ausschließlich für die Überwachung der Verformungen der Musterobjekte unter Druckbelastung⁷.

Der Verformung des Holzes unter verschiedene Druckkräfte wird mit Hilfe der Bildverarbeitungsverfahren untersucht. Das erforschte Objekt wird mit verschiedenen Druckkräfte zwischen 0 und 500 Newton belastet. Mit Hilfe eines Fotoapparats wird im jede Phase jeweils ein Bilde erfasst beginnen mit dem Anfangszustand (ohne Belastung) und weiterhin während der verschiedenen Belastungsgrößen.

Für die Bestimmung des Verformungsfeldes wurden mit u, v den Komponenten der Verschiebungsvektor eines Punkts nach den beiden Achsen x, y notiert. Weil die Bewegungen der Punkte unterschiedlich sind, die Projektionen der Bewegungen werden gemäß die Punktkoordinaten sein.

$$u = u(x, y); v = v(x, y). \quad (4)$$

Wenn auf die x Achse die Entfernung zwischen zwei Punkte dx ist, nachdem die Verformung, wegen die ungleichmäßige Bewegung u , die Entfernung zwischen die zwei Punkte entlang der x Achse ändert sich. Die neue Entfernung wird folgend geschrieben

$$\Delta dx = u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx - u = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx. \quad (5)$$

Wenn diese Gleichung mit die ursprünglich Länge der dx Entfernung geteilt wird, dadurch wird die spezifische Dehnung in der Richtung der Achse definiert

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (6.a)$$

Dem Bewegung v , orientiert längs der y Koordinatenachse, entspricht eine spezifische Verlängerung

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (6.b)$$

und die spezifische Winkelverformung in der xy Ebene ergibt die

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (6.c)$$

Diese Gleichungen (6) sind die Gleichungen des geometrischen Aussehens wodurch die spezifischen Verformungen entsprechend der Bewegungen gegeben sind

⁷ Harangus, Katalin, "The image processing method in orthotropic material evaluation", *Research and Science Today*, 2(4), (2012): 143-154.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - 2\varepsilon_x \varepsilon_y + \gamma_{xy}^2}, \tag{7}$$

Der θ Winkel ist die Richtung der spezifischen Verformungen gegenüber den elastischen Hauptrichtungen

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \tag{8}$$

ERGEBNISSE

Das verwendete Material auf dem die Ergebnisse der Verfahren dargestellt werden, ist ein Kiefernholz. Auf die Oberfläche der Holzusters wurde eine Interessenbereich markiert (Abb. 1.) mit einem Durchmesser von 25 mm. Beginnend mit der Ausgangszustand (ohne Belastung), das Druckbelastung wurde schrittweise erhöht, mit jeweils 50 Newton, biss an das Wert von 500 Newton.

An jedes Belastungsniveau (nachdem das Interessenbereich eingescannt wurde) wurden die Ergebnisse ausgewertet. Anhand dieser Informationen, entsprechend der zwei Koordinatenachsen, wurden die Bewegungen der Punkte erhalten (mit einer Pixel-Genauigkeit der gleich mit der vorgegebene horizontale und vertikale Durchlaufschritt des Einscannens ist) (Tabelle 1.).

Tabelle 1. Daten der Kiefernholzscheibe (Durchmesser 8 mm, Dicke 1 mm)

Kraft [N]	$\varepsilon_{1,0^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	$\varepsilon_{2,0^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	$\varepsilon_{1,15^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	$\varepsilon_{2,15^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	...	$\varepsilon_{1,90^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	$\varepsilon_{2,90^\circ}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
0	0	0	0	0		0	0
50	9.2047	-58.5047	-5.7026	-62.2974		-16.5771	8.1771
100	21.2736	-138.4736	3.4335	-152.8335		-13.5608	-82.9392
150	30.5302	-216.4302	22.5131	-253.8131		-39.3838	19.4838
200	37.3128	-303.9128	26.2712	-346.6712		-44.6199	21.7199
250	42.3007	-394.8007	32.8839	-615.0839		-46.1047	19.4047
300	49.3273	-487.3273	44.2852	-730.8852		-43.3911	11.8911
350	57.0612	-591.4612	61.9103	-852.6103		-37.0819	0.0819
400	63.2390	-690.4390	78.3685	-985.0685		-26.5264	-14.0736
450	69.7928	-806.4928	92.1429	-1115.6429		-15.2272	-30.3728
500	76.6593	-925.4593	107.7645	-1243.2645		2.0556	-46.6556

Anhand dieser Werte bietet unser Programm die Möglichkeit der Bestimmung der Verformungen in die beiden Richtungen der afferenten spezifischen Verformungen. Alle

Verformungen werden entweder in der Form einer Karte oder in der Form einiger Grafiken verfügbar.

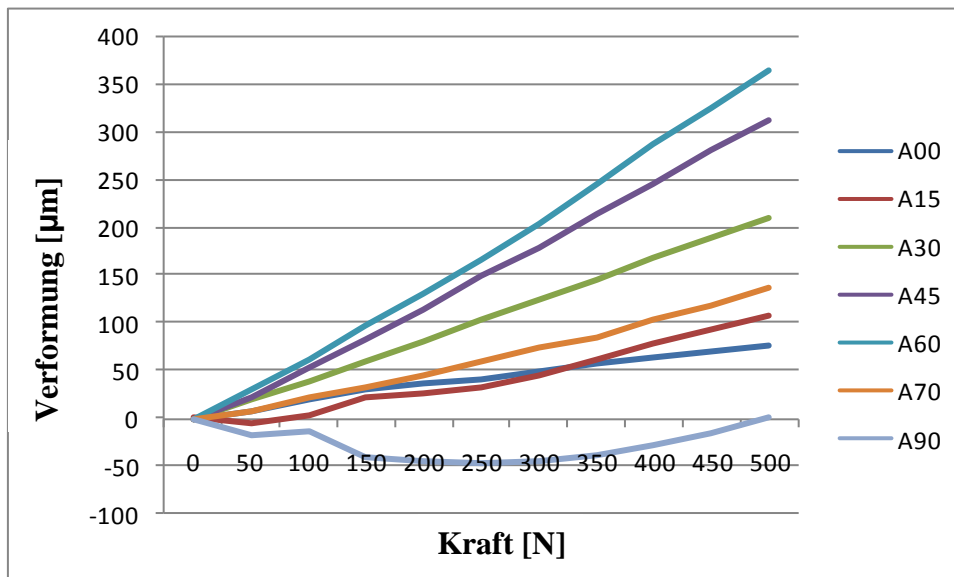


Abb. 2 – Die Verformungen an unterschiedliche Kraftbelastungen

Die Bezeichnungen von A00...A90 beziehen sich auf die Faserorientierung gegenüber die vertikale Achse (die y Achse). Wenn man diese Grafik analysiert, werden wesentliche Veränderung zwischen die spezifischen Verformungen und die Änderungen der Faserorientierung erscheinen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Bildverarbeitungsverfahren ist ein zerstörungsfreies Verfahren welches in der Analyse orthotropen Material angewendet werden kann, in unserem Fall, für die Analyse des massiven Holzes. Mit Hilfe eines Programmes entwickelt basierend auf die „free-form“ Verformungsmuster, wird es möglich die Bestimmung der Verformungsfeldes in eine Interessenzone oder können Informationen über die gesamte Oberfläche der Musterprobe erhalten werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens liegt in der Möglichkeit verschiedene Punkte zu markieren und deren Daten hinsichtlich der Verformung zu erhalten.

Aufgrund der digitalen Bildanalyse dieser Systems, dieses Software kann nicht nur das Verschiebungsfeld Studieren, sondern auch die entsprechende, spezifische Verformungsfelder. Diese Daten können der Forscher entweder als Bilder wie auch als

Diagramme zur Verfügung gestellt, bzw. im EDV-Format durch die Übertragung dieser Daten in eine Excel-Datei.

Das Programm bietet eine Echtzeit-Erfassung (mit einer Abtastrate von ca. ein Bild/20 Sekunden) der Messdaten. In Zukunft können diese Daten eine wichtige Datenbank der Fachleute sein. Die entwickelte Methodik wird in die Zukunft die Durchführung von kostengünstigen und Untersuchungen mit hoher Feinheit erlauben.

REFERENCES

1. **Balci, S.K., Golland, P., Shenton, M., Wells III, W.M.;** *Free-Form B-spline Deformation Model for Groupwise Registration*. In: Statistical Registration Workshop: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention: MICCAI'07. Number WS 2007, p.23-30;
2. **Chiang, M.C., Leow, A.D., Klunder, A.D., Dutton, R.A., Barysheva, M., Rose, S.E., McMahon, K.L., De Zubicaray, G.I., Toga, A.W., Thompson, P.M.;** *Fluid registration of diffusion tensor images using information theory*. Medical Imaging, IEEE Transactions on 27, 2008, p.442-456;
3. **Choi, Y., Lee, S.;** *Injectivity Conditions of 2D and 3D Uniform Cubic B-Spline Functions*. Graphical Models 62, 2000, p.411-427;
4. **Ciociu, I.B., Grigoraş, V.;** *Tehnici moderne de procesare a semnalelor*, Iaşi: CERMI, 2005;
5. **Harangus, Katalin;** *The image processing method in orthotropic material evaluation*. Research and Science Today, 2(4), 2012, pg. 143-154;
6. **Holden, M.;** *A review of geometric transformations for nonrigid body registration*. Medical Imaging, IEEE Transactions on 27, 2008, p.111-128;
7. **Hsu, W., Hughes, J., Kaufman, H.;** *Direct manipulation of free-form deformations*. In: ACM Siggraph Computer Graphics, Number 2, ACM 1992, p.177-184;
8. **Modersitzki, J.;** *Numerical Methods for Image Registration*, Oxford University Press Series: Numerical Mathematics and Scientific Computation, 2004;
9. **Perperidis, D., Mohiaddin, R.H., Rueckert, D.;** *Spatio-temporal free-form registration of cardiac MR image sequences*. Medical image analysis 9, 2005, p.441-56;
10. **Rueckert, D., Aljabar, P., Heckemann, R.A., Hajnal, J.V., Hammers, A.;** *Diffeomorphic registration using B-splines*. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention: MICCAI'06. Number Pt 2, 2006, p.702-9;
11. **Sederberg, T.W., Parry, S.R.;** *Free-form deformation of solid geometric models*, ACM Siggraph Computer Graphics 20, 1986, p.151-160;
12. **Sotiras, A., Davatzikos, C., Paragios, N.;** *Deformable Medical Image Registration*, A Survey. RR-7919, INRIA, 2012, p.6.