Beate Dutschk\*, Philipp Ernst und Michael Heizmann

# Registrierung von multimodalen Sensordaten für die Oberflächeninspektion

Registration of multimodal sensor data for surface inspection

DOI 10.1515/teme-2019-0036

**Zusammenfassung:** Da vermehrt mehrere Sensorsysteme oder auch Multisensor-Systeme zur Charakterisierung von Oberflächen eingesetzt werden, kann durch eine geeignete Kombination der erhaltenen Ergebnisse ein holistisches Ergebnis erzielt werden. Die Grundlage dafür bildet eine passende Registrierung der unterschiedlichen Messungen der Oberflächentopografie. Dieser Beitrag beschreibt ein mögliches Verfahren für die Registrierung von multimodalen Sensordaten. Dabei wird für diesen Anwendungsfall zuerst eine Konturenextraktion zur Merkmalsgewinnung für eine grobe Registrierung eingesetzt, welche mit einem flächenbasierten Verfahren auf Basis der Transinformation zur feinen Registrierung ergänzt wird. Die Kombination kann die Zuverlässigkeit der Registrierung erhöhen, da die einzelnen Verfahren für sich alleine in manchen Fällen keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern.

**Schlüsselwörter:** Registrierung, 2,5D-Daten, Konturenextraktion, flächenbasierte Verfahren, Oberflächentopografie.

Abstract: For surface inspection the trend tends towards using multiple sensor systems respectively multisensor systems. With a suitable combination of measurements of surface topography a holistic result can be achieved. The basis therefore is an appropriate registration routine. In this contribution a feasible approach for registering multimodal sensor data is shown. For this use case first the contours are extracted for feature generation for coarse registration and supplemented with mutual information used as an area-based method for fine registration. The combination improves the reliability of the registration in case one method does not provide a meaningful result.

**Keywords:** Registration, 2.5D data, contour extraction, area-based methods, surface topography.

## 1 Einleitung

Durch die Verwendung von mehreren Sensorsystemen bzw. Multisensor-Systemen und einer Informationsfusion kann ein Ergebnis mit höherer Aussagekraft (z. B. hinsichtlich Auflösung, Robustheit und Unsicherheit) bei der mikroskopischen Erfassung der Oberflächentopografie von Produkten erzeugt werden, um steigenden Anforderungen in der Oberflächeninspektion gerecht zu werden [15]. Die verwendeten Sensorsysteme zeichnen sich in der Regel durch unterschiedliche Eigenschaften aus, die vorteilhaft kombiniert werden können. Ein Ansatz einer solchen Fusion von Aufnahmen mit konfokaler Mikroskopie und Weißlichtinterferometrie wurde in [2] vorgeschlagen. Prinzipiell sind solche Ansätze nicht begrenzt auf bestimmte Verfahren zur Sensordatengewinnung, sondern allgemein auf 2,5D-Daten<sup>1</sup> anwendbar.

Ein grundlegender und entscheidender Schritt zur erfolgreichen Fusion der einzelnen Messergebnisse stellt die geeignete Registrierung dar [17]. Dabei werden die Aufnahmen bestmöglich zur Deckung gebracht.

Multisensor-Systeme zur Oberflächeninspektion gehören inzwischen zum Portfolio zahlreicher Messsystemhersteller (z. B. [6, 8]). Häufig bieten diese aber noch keine Sensordatenfusion für Aufnahmen aus den unterschiedlichen verfügbaren Modi. Sofern keine präzisen Informationen über die Lage der Aufnahmen vorhanden sind (z. B. aus einer präzisen mechanischen Anordnung der unterschiedlichen Sensormodalitäten wie in [4]), ist vor einer Fusion eine Registrierung notwendig.

Zur Registrierung ist allgemein eine Vielzahl von unterschiedlichen Registrierungsmethoden verfügbar (siehe z. B. [17]), die sich in verschiedenen Anwendungsfeldern bewährt haben. Auch Kombinationen als hybride Verfahren sind denkbar. Es ist zu beachten, dass es kein universell anwendbares Registrierungsverfahren für beliebige

<sup>\*</sup>Korrespondenzautor: Beate Dutschk, Institut für industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, E-Mail: beate.dutschk@kit.edu Philipp Ernst, E-Mail: philipp.ernst@ise.fraunhofer.de Michael Heizmann, Institut für industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, E-Mail: michael.heizmann@kit.edu

<sup>1 2,5</sup>D-Daten werden auch als Höhen- oder Tiefenkarten bezeichnet und ordnen jedem Punkt der 2D-Grundfläche einen Höhenwert zu.

Eigenschaften der Sensordaten gibt und eine geeignete Variante für den entsprechenden Anwendungsfall auszuwählen bzw. zu entwerfen ist. Dennoch ist ein möglichst generalisierbares Verfahren, das für ein breites Spektrum von Anwendungen geeignet sein soll, erwünscht.

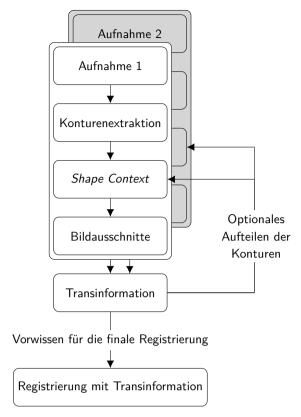
In diesem Beitrag wird ein Verfahren aufgezeigt, bei dem sowohl eine merkmalsbasierte als auch eine flächenbasierte Methode zur Registrierung von konfokalen und weißlichtinterferometrischen Aufnahmen verwendet wird. Das erarbeitete Vorgehen wird beschrieben, mit unterschiedlichen Datensätzen dargestellt und evaluiert. Für die Evaluierung des Vorgehens wird zunächst ein Konsistenztest nach [5] durchgeführt und weitere Ergebnisse präsentiert. Die mit der Vorgehensweise an den Datensätzen erreichte Registrierungsgüte lässt auf die Robustheit und Einsatzfähigkeit dieses Verfahrens schließen.

### 2 Methodik

Hier wird ein hybrides Registrierungsverfahren für die optische Oberflächeninspektion am Beispiel der konfokalen Mikroskopie und der Weißlichtinterferometrie dargestellt. Es setzt sich aus einer Kombination einer merkmals- und einer flächenbasierten Methode zusammen. Eine erfolgreiche Anwendung eines ähnlichen Verfahrens im Bereich der Ophthalmologie wird in [11] beschrieben, jedoch nur für eine Modalität eingesetzt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte (vgl. Abb. 1) erläutert, um die zwei Aufnahmen möglichst gut zur Deckung zu bringen und somit eine hohe Ähnlichkeit zugeordneter Bereiche entsteht.

Die verwendeten Daten werden hier mit einem Multisensor-System [6] aufgenommen. Selbst bei der Verwendung eines Multisensor-Systems ist die deckungsgleiche Ausrichtung beispielsweise aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Objektive nicht unbedingt gewährleistet und eine genauere Lageinformation ist nicht gegeben.

In der merkmalsbasierten Registrierung werden Merkmale aus Aufnahmen extrahiert und in Übereinstimmung gebracht. Gängige Merkmale wie beispielsweise Punkte, Linien oder Regionen können anhand von Kanten bestimmt werden. Aufgrund der physikalischen Charakteristika der verwendeten Aufnahmeprinzipien kann es vor allem an Kanten auf der zu untersuchenden Oberfläche zu fehlenden Datenpunkten und Artefakten kommen. Es hat sich gezeigt, dass die bloße Verwendung eines merkmalsbasierten Verfahrens durch fehlende Datenpunkte beeinträchtigt werden kann. Um dennoch mit einer merkmalsbasierten Registrierung hinreichendes Vorwissen für die flächenbasierte Registrierung zu generieren, werden fehlende Datenpunk-

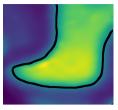


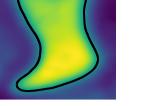
**Abb. 1:** Ablauf des hybriden Registrierungsverfahrens. Es beinhaltet die Aufnahme, die Konturenextraktion, die Verwendung des *Shape Contexts* sowie der Transinformation auf Bildausschnitten und führt schließlich unten mit dem Vorwissen und Transinformation zum Registrierungsergebnis.

te an Kanten interpoliert und so die Merkmalsextraktion ermöglicht. Mit dem Segmentierungsverfahren nach [10] werden die Konturen extrahiert. Durch die Verwendung der Kanten können die Konturbeschreibungen mitunter ungenau sein, aber dennoch zur Generierung von Vorwissen verwendet werden. Liegen Konturen nicht geschlossen in Aufnahmen, werden die offenen Konturen verwendet.

Für den Vergleich von Konturen existieren verschiedene Verfahren wie Shape Context (z. B. [1]), Chaincode (z. B. [3]) oder Fouriermethoden (z. B. [16]). Im Folgenden wird der Shape Context verwendet, da er unter anderem für offene Konturen eingesetzt werden kann. Der Shape Context beschreibt die relativen Positionen der Konturpixel in einem Histogramm. Er gilt als robuster und diskriminativer Deskriptor für Formen und ermöglicht somit die Beschreibung einer Kontur und dadurch die Vergleichbarkeit mehrerer Konturen miteinander [1].

Für die Bestimmung des Shape Contexts werden hier N Konturpunkte aus der Konturenextraktion verwendet. Generell kann die Gestalt einer Kontur über die Vektoren eines Konturpunkts zu allen anderen N-1 Konturpunkts zu allen anderen zu all





(a) konfokale

**(b)** weißlichtinterferometrische Aufnahme

**Abb. 2:** Exemplarische Bildausschnitte um je eine extrahierte Kontur der Münze M1 mit normalisierten Höhenwerten.

turpunkten beschrieben werden. Je mehr Konturpunkte verwendet werden, desto exakter ist die Beschreibung. Um Abweichungen zwischen Konturen zuzulassen und die Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird beim Shape Context ein Histogramm der relativen Koordinaten eines Konturpunktes  $p_i$  zu den anderen Punkten verwendet. Da hier eine Interpolation eingesetzt wird, sind Abweichungen erwünscht. Das ermittelte Histogramm wird als Shape Context bezeichnet und enthält die Verteilung der relativen Position der Konturpunkte [1]. Es setzt sich aus der Häufigkeit  $h_i$  der Punkte in jedem der k Bereiche  $\mathcal{B}(k)$  des 2D-Histogramms aus Abstand und relativem Winkel des Log-Polar-Koordinatensystems jedes Konturpunkts q zum Ausgangspunkt  $p_i$  zusammen [1]:

$$h_i(k) = \#\{q \neq p_i : (q - p_i) \in \mathcal{B}(k)\}.$$
 (1)

Durch das Log-Polar-Koordinatensystem erhalten nahe Punkte mehr Bedeutung. Vorteilhaft am Einsatz des Shape Contexts ist die Invarianz gegenüber Translationen und Skalierung. Die Histogramme des Shape Contexts lassen sich über die  $\chi^2$ -Distanz [1] mit dem Kuhn-Munkres-Algorithmus vergleichen [9]. Je geringer die Kosten, desto höher ist die Übereinstimmung der Konturen. Da es z. B. bei uneindeutigen Konturen wie Kreisen oder Linien zu mehreren vergleichbaren Übereinstimmungen kommen kann, wird um die extrahierten Konturen ein Bildausschnitt (siehe Abb. 2) erzeugt, der für die weitere Bewertung mit der Transinformation herangezogen wird.

Die eigentliche Registrierung basiert auf der Bewertung der Ähnlichkeit der Bildausschnitte mittels Transinformation. Die Transinformation ist ein Verfahren der flächenbasierten Registrierung. Unter anderem wird sie häufig bei der Registrierung multimodaler Aufnahmen in der Medizintechnik oder in der Fernerkundung verwendet. Die Anwendung der Transinformation für die Registrierung von multimodalen Aufnahmen wird z. B. in [14] und [7] beschrieben. Die Transinformation

$$MI(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$$
 (2)

von zwei Aufnahmen A und B bildet sich aus deren Entropien H(A) und H(B) bzw. deren Verbundentropie H(A,B). Können unterschiedliche Überlappungsbereiche auftreten, wird in [12] die normalisierte Transinformation

$$NMI(A,B) = \frac{H(A) + H(B)}{H(A,B)}$$
(3)

vorgeschlagen. Die Optimierung der relativen Positionen der Bildausschnitte zueinander und später die finale Registrierung wird über einen evolutionären Ansatz [13] realisiert, da sich heuristische Verfahren besser eignen, um beispielsweise lokalen Optima zu entkommen, und somit die Wahrscheinlichkeit einer genauen Registrierung steigern. Die besten Resultate der Transinformation auf den Bildausschnitten der Konturpaare werden als Vorwissen für die finale Registrierung verwendet. Dadurch können mögliche auftretende Mehrdeutigkeiten reduziert und der Suchraum bei der finalen Registrierung verringert werden. Damit kann man eine höhere Robustheit erzielen. Sind die Ergebnisse mit den Bildausschnitten aufgrund von stark abweichenden Konturen nicht aussagekräftig genug, werden die Konturen in Abschnitte unterteilt. In diesem Fall erfolgt erneut eine Bewertung von Konturpaaren mit dem Shape Context und der Transinformation auf den neu entstehenden Bildausschnitten.

Bestenfalls liegen für die Überprüfung eines Registrierungsvorgehens Ground-Truth-Daten oder Vergleichsdaten vor. Sind diese nicht vorhanden und können keine Referenzmarken in die Szene eingebracht werden, ist es schwierig, die Genauigkeit einer Registrierung objektiv zu bewerten. Dennoch kann mit einem Konsistenztest wie in [5] eine Aussage über die Robustheit eines Registrierungvorgehens getroffen werden. Als robust wird eine Methode dann bezeichnet, wenn sie von unterschiedlichen Ausgangssituationen in der Lage ist, die bestmögliche Registrierung zu finden. Dabei wird eine direkte Registrierung mit künstlich aufgeprägten Veränderungen verglichen. Die Gesamtregistrierung sollte bestenfalls mit der direkten Registrierung übereinstimmen.

## 3 Ergebnisse und Evaluation

Für die Registrierung werden konfokale und weißlichtinterferometrische Aufnahmen mit dem DCM8 der Firma Leica [6] mit einer zwanzigfachen Vergrößerung herangezogen. Die exemplarisch untersuchten Oberflächen sind aus Metall mit verschiedenen Beschaffenheiten (siehe Abb. 3). Sie enthalten markante Eigenschaften wie Flanken, weitgehend homogene Bereiche und Defekte. In den Aufnahmen

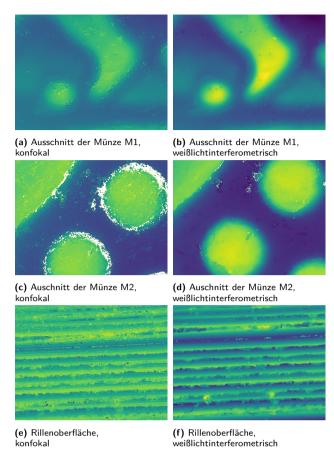
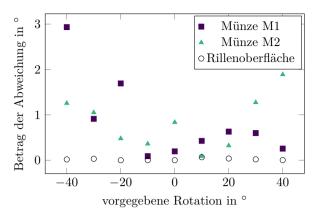


Abb. 3: Oberflächen mit normalisierten Höhenwerten.

in Abb. 3a und Abb. 3b einer Münze M1<sup>2</sup> sind stark charakteristische Formen zu erkennen. Ebenso sind in dem Ausschnitt der Münze M2<sup>3</sup> in Abb. 3c und Abb. 3d deutliche Kreise erkennbar. Die Kreise können Mehrdeutigkeiten erzeugen, die größtenteils aus der gewählten Kombination des *Shape Contexts* mit der Transinformation aufgelöst werden können. Bei den Aufnahmen in Abb. 3e und Abb. 3f besteht eine der Schwierigkeiten in der zum Teil gleichförmigen Streifenstruktur des Untersuchungsgegenstands.

Für die Registrierung wird das vorgestellte Verfahren mit dem Shape Context in Kombination mit der Transinformation angewendet. Dabei kann die Anzahl der verwendeten Konturen entsprechend der Charakteristik der Aufnahme angepasst werden. Für diese Untersuchung werden die drei jeweils längsten Konturen herangezogen. Die Konturen beider Aufnahmen werden für den Shape Context verwendet. Anschließend werden nur die besten Übereinstimmungen (siehe Abschnitt 2) für die weitere Berechnung benutzt. Für die Evaluation wird ein Konsistenztest



**Abb. 4:** Ergebnisse des durchgeführten Konsistenztests. Dargestellt ist die Abweichung der ermittelten Rotation einer Aufnahme zu der vorgegebenen Rotation eines Ausschnitts der Aufnahme.

durchgeführt. Dazu werden Aufnahmen rotiert und Bildausschnitte erzeugt. Generell ist in der Anwendung von kleinen Positionsänderungen auszugehen, da die Probe für die Aufnahmen möglichst exakt positioniert werden sollte. Anschließend wird die vorgestellte Registrierung durchgeführt und die Abweichung der Rotation ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Es zeigt sich, dass für die untersuchten Aufnahmen ein Registrierungsergebnis mit geringen Abweichungen (siehe Abb. 4) erreicht werden kann. Kleine Abweichungen können durch die vorhandenen Unterschiede in den Aufnahmen entstehen. Tendenziell fällt die Rotationsabweichung bei unregelmäßigeren Strukturen höher aus. Der verwendete Ansatz eignet sich somit durchaus für die Registrierung multimodaler Aufnahmen. Bei uneindeutigen Konturen wie z. B. den Kreisen der Aufnahmen von Münze M2 in Abb. 3c und Abb. 3d sind unter Umständen die Werte des Shape Contexts ähnlich und somit ist die Verwendung des flächenbasierten Verfahrens der Transinformation auf den Bildausschnitten essentiell.

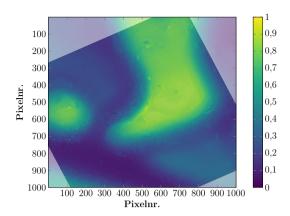
**Tab. 1:** Untersuchung der Translation mit je zwei vorgegebenen Verschiebungen in x-und y-Richtung. Dargestellt ist jeweils der Betrag des Mittelwerts und die Standardabweichung von je neun Registrierungsvorgängen an unterschiedlichen Bildausschnitten.

	${\sf x}$ in $Pixel$	y in $Pixel$	Rotation in °
Münze M1	$5 \pm 0.92$	$29 \pm 1{,}47$	$0.13 \pm 0.06$
Münze M2	$137 \pm 2{,}06$	$34 \pm 5{,}57$	$0,36 \pm 0,25$
Rillenoberfläche	$70 \pm 0{,}04$	$23 \pm 0.55$	$0.01 \pm 0.01$

Eine Überprüfung der Translation wird mit in x- und y-Richtung abgetrennten Bildausschnitten durchgeführt (siehe Tabelle 1). Aufgrund von ungenauen Konturen und

<sup>2</sup> Ausschnitt einer italienischen 2-Cent-Münze

<sup>3</sup> Ausschnitt einer costa-ricanischen Münze



**Abb. 5:** Registrierungsergebnis der Münze M1 mit normalisierten Höhenwerten. Die weißlichtinterferometrische Aufnahme ist im Hintergrund und die konfokale Aufnahme ist im Vordergrund.

einigen ungemessenen Punkten an den Kanten der Münze M2 kommt es bei diesem Objekt zu größeren Abweichungen. Die geringe Standardabweichung zeigt, dass das Verfahren prinzipiell für die multimodale Registrierung geeignet ist. Abbildung 5 stellt beispielhaft ein erfolgreiches Registrierungsergebnis der Aufnahmen von Münze M1 dar.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Registrierung für multimodale Aufnahmen in der Oberflächenmesstechnik am Beispiel der konfokalen Mikroskopie und der Weißlichtinterferometrie dargestellt. Es wurde ein Ansatz, der ein merkmalsbasiertes mit einem flächenbasierten Verfahren verbindet, eingesetzt. Dies wird über extrahierte Konturen und deren Beschreibung bewerkstelligt. Vergleiche zeigen, dass sich die erhaltenen Registrierungsergebnisse als Grundlage für die weitere Datenfusion eignen.

Der Vorteil der Kombination dieser beiden Methoden liegt darin, dass die Messabweichungen der Konturen durch die anschließende flächenbasierte Registrierung ausgeglichen werden können. Dies ermöglicht die Anwendung des Verfahrens bei aufnahmebedingten, fehlenden oder ungenauen Informationen an steilen Kanten. Als Voraussetzung muss die Extraktion von Konturen möglich sein sowie eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den extrahierten Konturen bestehen. Prinzipiell ist das Verfahren nicht auf Aufnahmen aus einem Gerät beschränkt, sondern ist auch bei Aufnahmen unterschiedlicher Geräte anwendbar.

In weiteren Arbeiten soll das Zusammenspiel der Registrierung mit der Fusion sowie die Registrierung mithilfe von neuronalen Netzen betrachtet werden.

#### Literatur

- S. Belongie, J. Malik und J. Puzicha. Shape matching and object recognition using shape contexts. *IEEE transactions on* pattern analysis and machine intellig., 24(4):509–522, 2002.
- [2] B. Dutschk, M. Pordzik und M. Heizmann. Einsatz von Gaußprozessen und Weighted Least-Squares-Verfahren für die Fusion von konfokaler Mikroskopie und Weißlichtinterferometrie. tm - Technisches Messen, 85(s1):s7-s13, 2018.
- [3] H. Freeman. On the encoding of arbitrary geometric configurations. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, EC-10 (2):260–268, 1961.
- [4] S. Hagemeier und P. Lehmann. Multisensorisches Messsystem zur Untersuchung der Übertragungseigenschaften von Topographiesensoren. tm - Technisches Messen, 85(6):380–394, 2018.
- [5] M. Jenkinson und S. Smith. A global optimisation method for robust affine registration of brain images. *Medical Image Analysis*, 5(2):143–156, 2001.
- [6] Leica Microsystems GMS GmbH. Leica DCM 8 Abrufdatum 17.06.2019. URL https://www.leica-microsystems.com/de/ produkte/konfokalmikroskope/p/leica-dcm8/.
- [7] F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal und P. Suetens. Multimodality image registration by maximization of mutual information. *IEEE transactions on medical imaging*, 16(2):187–198, 1997.
- [8] Mahr GmbH. MarSurf CWM 100 Mahr Fertigungsmesstechnik Abrufdatum 12.06.2018. URL https://www.mahr.com/ de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarSurf---Optische-Messger%C3%A4te/MarSurf-CWM-100/.
- [9] J. Munkres. Algorithms for the assignment and transportation problems. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 5(1):32–38, 1957.
- [10] N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):62–66, 1979.
- [11] A. Rashid, J.-C. Klein und E. Parra-Denis. Ophthalmologic image registration based on shape-context: Application to fundus autofluorescence (FAF) images. Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, VIIP, 2008.
- [12] C. Studholme, D. Hill und D. J. Hawkes. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment. *Pattern Recognition*, 32(1):71–86, 1999.
- [13] M. Styner, C. Brechbühler, G. Székely und G. Gerig. Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI. IEEE transactions on medical imaging, 19(3):153–165, 2000.
- [14] P. Viola und W. M. Wells III. Alignment by maximization of mutual information. *International Journal of Computer Vision*, 24(2):137–154, 1997.
- [15] A. Weckenmann, X. Jiang, K.-D. Sommer, U. Neuschaefer-Rube, J. Seewig, L. Shaw und T. Estler. Multisensor data fusion in dimensional metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2):701–721, 2009.
- [16] D. Zhang und G. Lu. Review of shape representation and description techniques. *Pattern Recognition*, 37(1):1–19, 2004.
- [17] B. Zitová und J. Flusser. Image registration methods: a survey. Image and Vision Computing, 21(11):977–1000, 2003.