

Kalibrierung eines multimodalen Messsystems zur Inline-Deformationsanalyse an Kautschukextrudern

P.-F. Hagen, M. Kästner, E. Reithmeier

Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

mailto:felix.hagen@imr.uni-hannover.de

Zur Qualitätsüberwachung und Prozessregelung wird bei der Kautschukextrusion neben der Geometrie auch die Temperatur des extrudierten Profilstrangs benötigt. Mit dem im folgenden vorgestellten Messsystem lassen sich für diesen Zweck Profilschnitte während der Extrusion erzeugen, die neben der Profilgeometrie auch die Temperaturverteilung der Geometriedaten enthalten. Dieser Beitrag legt den Schwerpunkt auf die dafür durchzuführende Systemkalibrierung.

1 Einleitung

Bei der Kautschukextrusion wird Kautschuk innerhalb eines Extruders erhitzt, verdichtet und anschließend durch eine formgebende Düse gepresst [1, S. 266-275]. Durch die sogenannte Strangaufweitung tritt unmittelbar hinter der Düse eine Formabweichung auf, welche sich im Zuge des Abkühlvorgangs teilweise wieder zurückbildet [1, S. 89] [2, 3]. Um diese beiden Effekte zu charakterisieren, sollen während der Extrusion Geometrie- und Temperaturdaten des Extrudats überwacht werden.

Das hierfür entwickelte Messsystem ist in Abb. 1 dargestellt. Die Erfassung der Profilgeometrie erfolgt per radial angeordneter Lichtschnittsensoren, die jeweils aus einer Industriekamera c_i mit einer Auflösung von 2064 x 1544 Pixeln und einem Linienlaser bestehen. Für die Erfassung der Oberflächentemperatur wird eine Wärmebildkamera c_{IR} genutzt, welche auf einem ungekühlten Mikrobolometer basiert. Mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln weist diese Kamera eine geringe aber bauartbedingt typische Abbildungsleistung auf.

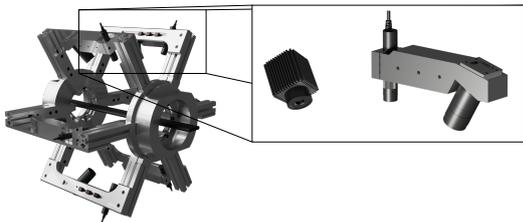


Abb. 1 CAD-Modell des Messsystems mit Detailansicht der Anordnung von Wärmebildkamera und Lichtschnittsensor.

Um die Geometrie- und Temperaturdaten zu verknüpfen, werden die Starrkörpertransformationen zwischen c_i und c_{IR} benötigt. Die unterschiedlichen Spektren, die sich mit c_i gegenüber c_{IR} abbilden lassen, sowie die geringe Abbildungsleistung, welche c_{IR} vorzuweisen hat, stellen hierbei jedoch erhöhte Anforderungen an die Systemkalibrierung. Im Fol-

genden wird eine Strategie vorgestellt, die neben einem speziellen Musterdesign eine Feinausrichtung nutzt, um die Systemkalibrierung genau durchzuführen.

2 Kalibriermethodik

Die intrinsischen Parameter der Kameras c_i werden entsprechend [4] ermittelt. Die Identifikation der Laserebene, welche für die Rekonstruktion der Geometrie benötigt wird, erfolgt nach [5]. Die Registrierung der Punktwolken jedes Lichtschnittsensors erfolgt über die Starrkörpertransformation, die sich aus einer Stereokalibrierung ergibt. Hierfür werden die Lichtschnittsensoren paarweise kalibriert. Die genannten Methoden basieren auf der Aufzeichnung eines Musters mit bekannter Struktur in verschiedenen Positionen. Hierbei wurde ein lithografisch gefertigtes Muster verwendet, welches eine hohe Genauigkeit in Bezug auf die Merkmalpositionen aufweist.

Um die Geometrie- mit den Temperaturdaten zu kombinieren, werden die Starrkörpertransformationen zwischen c_i und c_{IR} benötigt. Somit können die mit dem entsprechenden Lichtschnittsensor erfassten Objektpunkte auf den Sensor von c_{IR} projiziert werden und so den 3D Punkten korrespondierende Temperaturwerte zugeordnet werden.

Die geometrische Kalibrierung von c_{IR} erfolgt ebenso mit den zuvor genannten Methoden. Hierfür muss jedoch ein Muster genutzt werden, welches im sichtbaren Spektrum sowie im langwelligigen Infrarotspektrum des Lichts abgebildet werden kann. Basierend auf [6] wurde ein Punktmuster entworfen, wobei die Punkte aus eingefärbtem Epoxidharz und der Grundkörper aus Aluminium besteht. Durch die unterschiedlichen Emissionskoeffizienten der beiden Materialien sowie einer geringen Erwärmung des Musters um 4 Kelvin relativ zur Umgebungstemperatur, lässt sich das Muster in beiden Spektren mit einem deutlichen Kontrast abbilden (Abb. 2).

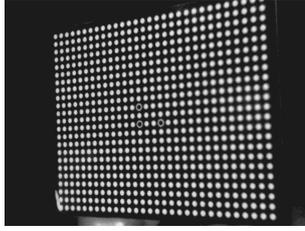


Abb. 2 Infrarotaufnahme des Musters.

Entsprechend Abb. 3 sowie Gl. 1 und Gl. 2 erfolgt nun die Ausrichtung von c_{IR} . Aus der zuvor genannten paarweisen Kalibrierung steht bereits $c_2 T_{c_1}$ zur Verfügung. Die Startwerte für $c_1 T_{c_{IR}}$ und $c_2 T_{c_{IR}}$ werden ebenso per Stereokalibrierung ermittelt. Darauf folgt eine Feinausrichtung. Hierbei werden die Objektpunkte P aller aufgezeichneten Musterposen $pat_{l,k}$ über jede direkte und zusammengesetzte Starrkörpertransformation auf den jeweiligen Kamerasensor projiziert und dort mit den aufgezeichneten Bildpunkten der korrespondierenden Musterpose über den Rückprojektionsfehler (RPE) verglichen. $c_1 T_{c_{IR}}$ und $c_2 T_{c_{IR}}$ werden iterativ angepasst bis der RPE ein Minimum erreicht. $c_2 T_{c_1}$ wird aufgrund der hohen Güte, durch Verwendung des lithografischen Musters und der hohen Abbildungsleistung, als konstant gesetzt.

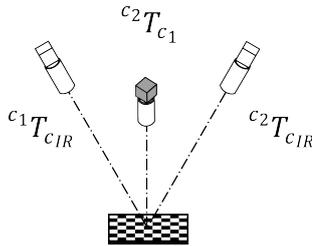


Abb. 3 Anordnung der Kamerasysteme.

$$\epsilon_{rpe} = \|P'(P_{pat_{l,k}}, {}^{c_A} T_{pat_{l,k}}, {}^{c_B} T_{c_A}) - P^{d,c_B}\|^2 \quad (1)$$

$A, B \in \{1, 2, IR\}$

$$\arg \min_{c_i T_{c_{IR}}, i \in \{1, 2\}} \sum_{l,k} \sum_A \sum_B \epsilon_{rpe} \quad (2)$$

3 Ergebnisse

Mithilfe der beschriebenen Methode lässt sich das System insgesamt mit einem geringen RPE kalibrieren. Die intrinsischen Parameter von c_1 und c_2 können mit einem RPE von 0,09 Pixeln und 0,12 Pixeln ermittelt werden. Für c_{IR} liegt hier der RPE bei 0,11 Pixeln. Die Starrkörpertransformation $c_2 T_{c_1}$ kann mit einem RPE von 0,08 Pixeln ermittelt werden. Wird der RPE unter Zuhilfenahme aller Starrkörpertransformationen berechnet, so ergibt sich nach der Feinausrichtung ein über alle Musterposen nahezu gleichverteilter RPE mit einem arithmetischen Mittelwert von 0,22 Pixeln. Es ergibt sich hiermit eine erfolgreiche Kalibrierung, mit der sich mul-

tidimensionale Profilschnitte erzeugen lassen, wie zum Beispiel auf Abb. 4 dargestellt.

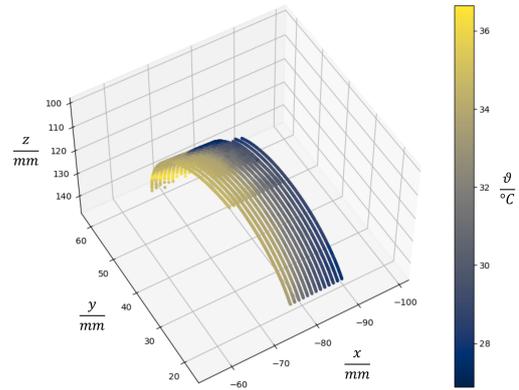


Abb. 4 Messung eines erhitzten Kunststoffzylinders.

4 Fazit und Ausblick

Mit der hier vorgestellten Methode kann das System erfolgreich kalibriert werden. Durch die Verwendung eines speziellen Musters, lässt sich die Musterstruktur mit guten Kontrastverhältnissen in beiden genannten Spektren des Lichts abbilden. Die Verwendung zweier Hilfskameras mit vergleichsweise hoher Abbildungsleistung erlaubt die Systemkalibrierung mit geringem RPE trotz geringer Abbildungsleistung der Wärmebildkamera. Eine Verfeinerung der intrinsischen Parameter der Wärmebildkamera könnte hier die Ergebnisse weiter verbessern.

Das hier vorgestellte System wird im Rahmen des Verbundforschungsprojektes DIGIT RUBBER (Förderkennzeichen 13XP5126) entwickelt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle und organisatorische Unterstützung.

Literatur

- [1] C. Bonten, *Kunststofftechnik* (Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2016).
- [2] E. Miller and J. P. Rothstein, "Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradients," *Rheologica Acta* **44**(2), 160–173 (2004).
- [3] D. Tang, F. H. Marchesini, L. Cardon, and D. R. D'hooge, "State of the–Art for Extrudate Swell of Molten Polymers: From Fundamental Understanding at Molecular Scale toward Optimal Die Design at Final Product Scale," *Macromolecular Materials and Engineering* **305**(11), 2000340 (2020).
- [4] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **22**(11), 1330–1334 (2000).
- [5] F. Zhou and G. Zhang, "Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations," *Image and Vision Computing* **23**(1), 59–67 (2005).
- [6] R. Usamentiaga, C. Ibarra-Castanedo, and X. Maldague, "Comparison and evaluation of geometric calibration methods for infrared cameras to perform metric measurements on a plane," *Applied optics* **57**(18), D1–D10 (2018).