

Solving 3D: Filmtechnik bewährt sich in der Stahlproduktion

# Berührungslose 3-D-Vermessung dynamischer Vorgänge mit Highspeedkameras

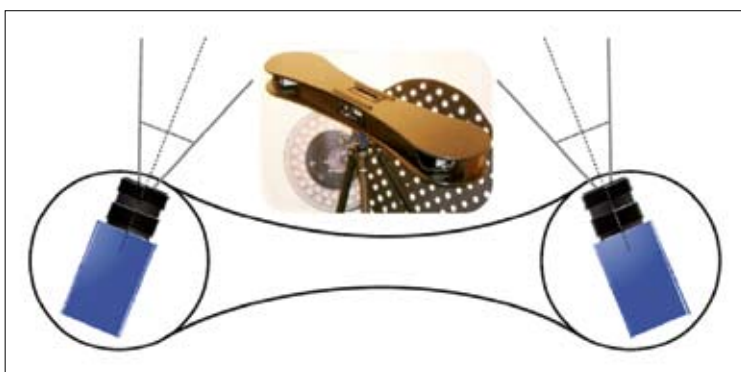
Die optische, berührungslose Vermessung wird zur Überwachung und Qualitätssicherung von Großanlagen und Maschinen in der Schwerindustrie eingesetzt. Der Einsatz von Highspeedkameras erlaubt hierbei die Kontrolle dynamischer Prozesse. Hochfrequente Schwingungen mit kleinen Amplituden können ohne aufwändige Montagearbeiten registriert werden. Negative Auswirkungen auf die Standzeit der Anlagen und die Qualität der Produkte können so frühzeitig erkannt werden.

Bernd-Michael Wolf

Motiviert durch die Massenanwendung in der Filmproduktion für Fernsehen und Kino im Full-HD-Format (1 920 Pixel · 1 080 Pixel) wurden Highspeedkameras mit einer deutlich höheren Auflösung entwickelt. Eine Auflösung von 2 000 Pixel · 2 000 Pixel (4 Megapixel) bei 1 000 Hz stellt derzeit den aktuellen Stand der Technik dar. Extrem kurze Belichtungszeiten von 3 µs (1/300 000 s) und Datenraten von 400 Gbit/s kennzeichnen die leistungsfähigsten Highspeedkameras am Markt. Die neuen Kameras ermöglichen eine breitere Anwendung der Fotogrammetrie für dynamische Vorgänge in der Produktion.

## Fotogrammetrische 3-D-Vermessung mit Highspeedkameras

Basierend auf zwei Kameras, die von unterschiedlichen Standpunkten dasselbe Objekt beobachten, kann in der stereoskopischen Auswertung das Objekt dreidimensional vermessen werden. Die erreichbaren Genauigkeiten der optischen 3-D-Vermessung sind im Wesentlichen von der Auflösung



1 Stereorig, Anordnung von zwei Kameras in der HiSIM.stereo mit variablem Bildwinkel und fester Basis von 900 mm

des optischen Systems aus Objektiv und Aufnahmesensor abhängig. Bei Highspeedaufnahmen ist in der Regel die Auflösung des Sensors das beschränkende Element, hochauflösende und lichtstarke Objektive stehen aus der Fotografie in genügender Auswahl zur Verfügung. Im Folgenden wird erläutert, wie das Genauigkeitspotenzial für die fotogrammetrische Auswertung einfach abgeschätzt werden kann. Zunächst hängt die Bildauflösung vom Verhältnis der Objektgröße zur Anzahl Pixel ab:

$$\frac{\text{Objektgröße}}{\text{Anzahl der Pixel}} = \text{Bildauflösung} \quad (1)$$

Für ein Objekt mit einer Größe von 1 000 mm ergibt sich mit einem 4-Megapixel-Sensor (2 000 Pixel · 2 000 Pixel) eine Bildauflösung von 0,5 mm/pix. Fotogrammetrische Messmarken, die sich einfach auf dem Prüfling aufbringen lassen, können zuverlässig mit einer Genauigkeit von 0,1 Pixel angetastet werden, unter optimalen Voraussetzungen (keine Verschmutzung der Marken, gute Beleuchtungsverhält-

nisse, keine Verdeckungen) werden bis zu 0,02 Pixel erreicht.

Es wurden die Messgenauigkeiten und Messauflösungen ermittelt, die von fotogrammetrischen Systemen erreicht werden. In Abhängigkeit der Objektgröße ergibt sich eine Messgenauigkeit von bis zu 0,03 bzw. 0,12 mm (3-Sigma). Unter optimalen Bedingungen können mit den neuen hochauflösenden Highspeedkameras relative Messauflösungen von bis zu 1 : 100 000 erreicht werden.

Für 3-D-Auswertungen dynamischer Prozesse werden mindestens zwei synchron aufnehmende Kameras benötigt, jeder Punkt muss aus zwei unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, damit eine 3-D-Koordinate berechnet werden kann. Zur Abschätzung der erreichbaren Messgenauigkeit der 3-D-Punktbestimmung genügt eine weitere Arbeitsformel, in die der Abstand  $d$  zwischen den beiden Kamerastandorten  $K1$  und  $K2$  und der mittlere Abstand zum Prüfling  $P$  eingeht.

$$\frac{d_{K,P}}{d_{K1,K2}} = \text{Höhe/Basis-Verhältnis} \quad (2)$$

In der industriellen Anwendung ergeben sich aus praktischen Gründen typische Höhe/Basis-Verhältnisse von 1 : 1,5 bis 1 : 5. Die Genauigkeit in Aufnahme­richtung verschlechtert sich mit dem Höhe/Basis-Verhältnis.

Die Aufnahmen der beiden Kamerastandorte können prinzipiell durch die Aufstellung und Ausrichtung von zwei individuellen Kameras realisiert werden. Das System muss allerdings hinsichtlich der Basis und der jeweiligen Ausrichtung kalibriert werden. Durch die Verwendung von zwei fest installierten Kameras auf einem sogenannten Stereo-Rig entfällt der andernfalls stets zu wiederholende Kalibrierprozess. Typische Basisabstände, die mit Hilfe eines Stereo-Rigs realisiert

werden können, liegen bei 500 mm bis etwa 1 500 mm. In Bild 1 ist das Prinzip eines Stereo-Rigs am Beispiel des HiSIM.stereo dargestellt. Der Bildwinkel kann durch Drehung der Kameras variiert werden. Weiterhin notwendig bleibt bei der Verwendung von zwei Kameras die notwendige zeitliche Synchronisation zur zeitgleichen Aufnahme des dynamischen Prozesses.

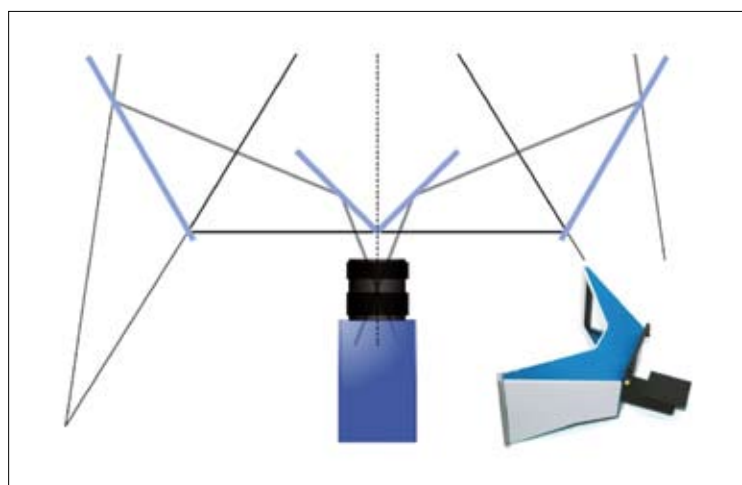
Eine preisgünstige Alternative zum Stereo-Rig mit zwei Kameras ist ein Stereospiegelvorsatz, der eine Aufnahme aus zwei (virtuellen) Standorten mit nur einer einzigen Kamera ermöglicht. Das Prinzip der Strahlteilung über die Spiegel ist in Bild 2 am Beispiel des 3-D-CamSplitters dargestellt. Der Abstand der beiden virtuellen Kameras ist konstant, der Bildwinkel ist durch den fixierten Spiegelvorsatz fest vorgegeben. Nachteil der Strahlteilung ist, dass die Auflösung der Aufnahme reduziert wird, da nur die Hälfte der Aufnahme­fläche pro Bild zur Verfügung steht. Die Halbierung der Aufnahme­fläche erfolgt in Höhe und Breite, dadurch verdoppelt sich die mögliche Aufnahmefrequenz. Mit der verbleibenden Auflösung von 1 000 Pixel · 1 000 Pixel und einer

gesteigerten Aufnahmefrequenz von 2 000 Hz steht ein handliches, robustes und kostengünstiges 3-D-Highspeedmesssystem zur Aufnahme dynamischer Prozesse zur Verfügung.

### Dynamische 3-D-Vermessung am Fertigerüst in der Walzanlage

Zur Optimierung der Standzeit von Anlagen und für die Verbesserung der Produktqualität ist eine optische Qualitätskontrolle der in der Produktion ablaufenden dynamischen Prozesse sinnvoll. Das Auftreten kleiner, hochfrequenter Schwingungen bei der Umformung kann während des Walzvorgangs mit Highspeedkameras und fotogrammetrischen Auswertemethoden analysiert werden. Aus den Messungen können Rückschlüsse auf den Anlagenzustand abgeleitet werden. Insbesondere die Auswirkungen auf die Produktqualität werden vielfach im Rahmen von FEM-Berechnungen untersucht [1 ... 3]. Die fotogrammetrische Auswertung liefert für die Analyse Messwerte ohne großen Installationsaufwand.

Die Nutzung hochauflösender Highspeedkameras in Kombination mit einer fotogrammetrischen

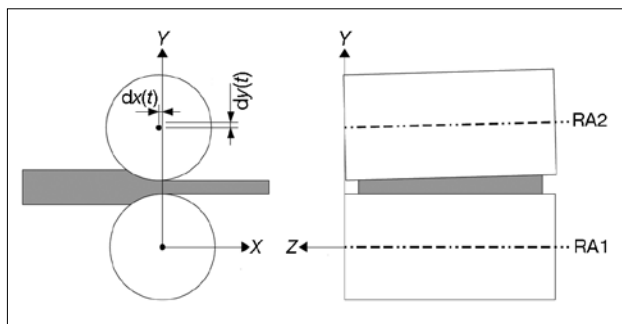


2 Spiegelstereovorsatz, Prinzip der Strahlteilung mit vier Spiegeln für die Nutzung einer Kamera als Stereomesssystem am Beispiel des 3-D-CamSplitters. Es entstehen zwei virtuelle Kameras mit fester Basis. Eine Synchronisation für die Aufnahmen entfällt



3

Fertiggerüst, Bedienseite und Arbeitswalzen sind für fotogrammetrische Vermessung gut zugänglich



4

Photogrammetrisch messbare Verschiebungen der Walzenachsen während des Walzvorganges. Zur Verdeutlichung sind hier die Messungen auf die Rotationsachse RA1 der unteren Arbeitswalze bezogen. Die Abstände  $dx(t)$  und  $dy(t)$  kennzeichnen die Verschiebungen zum Zeitpunkt  $t$  in die jeweilige Walzrichtung. Der Winkel zwischen den Achsen RA1 und RA2 kann ebenfalls bestimmt werden

Auswertung ermöglicht die Bestimmung der während der einzelnen Phasen des Walzvorganges auftretenden Relativbewegungen der Arbeitswalzen mit sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflö-

sung. Hierzu wird ein festes Bezugssystem am Fertiggerüst und ein rotierendes System auf den Achsen der Arbeitswalzen montiert. Zusätzliche Markierungen an den Lagerbauteilen ermöglichen die Erfassung der Relativbewegungen aller Bauteile zueinander. Die 3-D-Auswertung erlaubt die Bestimmung von Lageänderungen in allen drei Raumrichtungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Elektrische oder hydraulische Installationen sind nicht notwendig, lediglich fotogrammetrische Messmarken am Ständer und an den Walzachsen werden für die Messung benötigt. Der Ständer muss für die Vermessung lediglich von der Bedienseite zugänglich sein, Bild 3.

Bild 4 gibt eine Prinzipskizze der Messungen an den Arbeitswalzen wieder. Das rotierende System stellt das Formelement Kreis dar, dessen Mittelpunkt in der Rotationsachse der Arbeitswalzen liegt. Aus der kreisförmigen Anordnung dieser Punkte wird rechnerisch der Mittelpunkt der rotierenden Punkte als Kreis im Raum bestimmt. Auf Basis einzelner 3-D-Punkte und ihrer rechnerischen Ausgleichung mit der Kleinste-Quadrate-Methode nach Gauß kann die Lage der Rotationsachse zu jedem Aufnahmezeitpunkt, also bis zu 1 000 mal pro Sekunde, auf 0,2 mm (3-Sigma) bestimmt werden.

Auf diese Weise können synchrone zeitliche Verläufe der Verschiebungsbeträge  $dx(t)$  und  $dy(t)$  der Rotationsachsen der beiden Arbeitswalzen bestimmt werden. Auch die Richtung der beiden Rotationsachsen RA1 und RA2 im Raum wird bei der 3-D-

Auswertung mit bestimmt, siehe auch Bild 4. Die Kontrolle einer zunehmenden Schiefstellung ist damit mit einer Genauigkeit von  $1/100^\circ$  möglich, auf eine Walzenbreite von 2 m lassen sich – nur von der Bedienseite des Fertiggerüsts aus – Taumelbewegungen der Walzenachsen mit Genauigkeiten von etwa 0,6 mm bestimmen.

### Fazit

Hochauflösende Highspeedkameras mit Auflösungen von bis zu 4 Megapixel (Sensor 2 000 Pixel · 2 000 Pixel) bei Aufnahmefrequenzen von bis zu 1 000 Bildern pro Sekunde eröffnen der dynamischen Fotogrammetrie neue Anwendungsfelder. Die hohe räumliche Auflösung erlaubt die Analyse dynamischer Prozesse großer Bauteile und Maschinen mit einer Präzision, die bislang nur mit immensum Aufwand an Geräten möglich war.

Insbesondere für präzise Analysen des Ist-Zustandes von Anlagen ohne großen Installationsaufwand kann die optische Messtechnik wertvolle Daten für Entscheidungen oder für die Ursachenforschung liefern. Genauigkeiten von bis zu 0,1 mm bei einer Objektausdehnung von 4 m sind nun möglich. Die Leistungsmerkmale der dynamischen, fotogrammetrischen Messtechnik und Analyse kann dank der neuen Highspeedkameras auch hier zum Tragen kommen: Mobilität, geringer Installationsaufwand, eindrucksvolle Dokumentation und hohe Präzision.

Dr.-Ing. Bernd-Michael Wolf,  
Solving3D GmbH, Garbsen

### Literatur

- [1] Forouzan, M. R.; Kiyani, I.; Salimi, M.; Ghassemi, A.: Analysis of chatter vibration in cold strip rolling, part I: system equivalent damping, Metal Forming, Vol. 1, 2008, S. 475/82.
- [2] Forouzan, M. R.; Kiyani, I.; Niroomand, M. R.; Salimi M.: Analysis of chatter vibration in cold strip rolling, part II: optimization of the process parameters, ibd., S. 483/89.
- [3] Mehrabi R.; Silliani M.; Ziaei-Rad S.; Salimi M.; Kamranian A.: Investigation of influences of operational parameters on chatter vibration of cold rolling machines using finite element method, ibd., S. 467/74.