

INLINE-SYSTEM FÜR SCHNELLE DRAHTINSPEKTION

180 Kilometer pro Stunde

Andreas Blug, Bernhard Blug, Daniel Carl,
Andreas Hofmann und Holger Kock, Freiburg

Bisherige Bildverarbeitungssysteme versagen bei der Inspektion von Defekten im Bereich von einigen Millimetern bis zu 100 Mikrometern auf einer sich sehr schnell bewegenden Drahtoberfläche. Solche Fehler erkennt das Inspektionssystem vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, erstmals inline. Dies gelingt durch eine pixelparallele Bildverarbeitung mit zellularen neuronalen Netzen, die eine Bildauswertung mit bis zu 10 kHz ermöglichen.

Draht wird meist per Kaltumformung hergestellt und dabei ein gewalzter Drahtrohling mehrstufig durch sich verjüngende Öffnungen von Ziehsteinen gezogen. Auf diese Weise wird der Draht dünner und länger. Wegen der hohen Drahtgeschwindigkeit von bis zu 50 m/s sind Ziehsteine starkem Verschleiß unterworfen und können die Drahtoberfläche beschädigen.

Moderne Drahtziehmaschinen haben

typischerweise acht bis zwölf Stufen, in denen der Draht nach und nach durch immer kleinere Öffnungen gezogen wird, bis er schließlich den gewünschten Durchmesser und die gewünschten Oberflächen- beziehungsweise Materialeigenschaften aufweist. So ein Prozess ist in der Regelung sehr anspruchsvoll und kann daher nicht über lange Zeit fehlerfrei gefahren werden. Typische Drahtfehler sind Querriefen, Ziehriefen oder sogenannte

Rattermarken, die durch Resonanzschwingungen entstehen. Die Strukturgrößen dieser Defekte bewegen sich im Bereich von einigen Millimetern bis hinunter zu 100 μm .

Bisherige Bildverarbeitungssysteme versagen bei der Inspektion solcher Defekte auf der sich sehr schnell bewegenden Drahtoberfläche. Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, haben nun

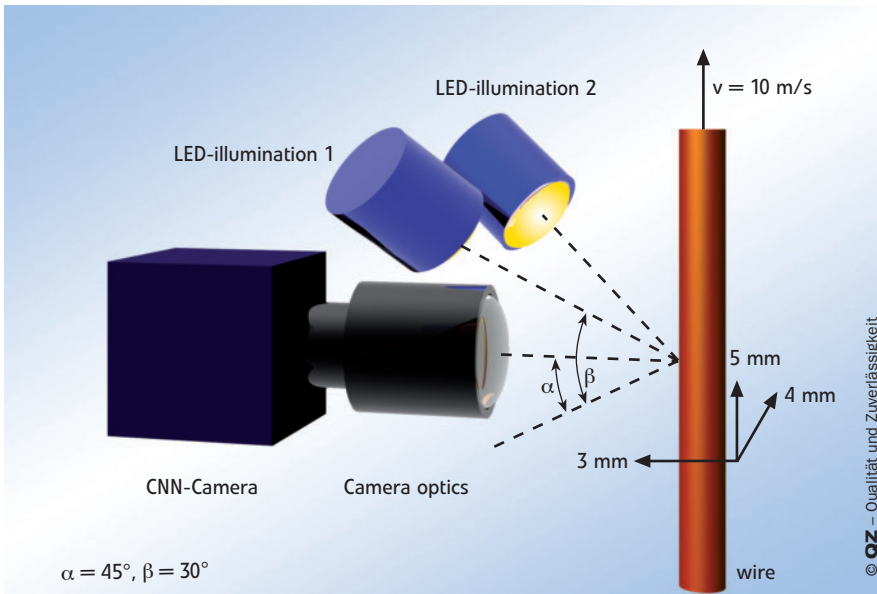


Bild 1. Inspektionssystem: Eine CNN-Kamera und zwei LED-Beleuchtungskanäle erlauben die Überwachung eines 90-Grad-Segments des Drahts. Zur Inspektion der gesamten Drahtoberfläche benötigt man insgesamt vier CNN-Kameras mit dazugehöriger Beleuchtung.

erstmal ein inlinefähiges Bildverarbeitungssystem entwickelt, das aufgrund einer kamerainternen, pixelparallelen Bildverarbeitung und einer speziell angepassten Beleuchtung bei Ziehgeschwindigkeiten von 50 m/s bis zu 1,5 mm feine Kratzer auf einem Aluminiumdraht erkennen und gleichzeitig auswerten kann. Selbst winzige Defekte im Bereich von 100 µm nimmt das FlexFormCNN genannte System auf einer Drahtoberfläche noch wahr, wenn diese mit 10 m/s am Inspektionssystem vorbeifließt. Wie aber sind solche Messgeschwindigkeiten überhaupt möglich?

Jedes Pixel mit eigenem Prozessor

Um die extrem kurzen Messzeiten zu erreichen, haben die Wissenschaftler ein Bildverarbeitungssystem entwickelt, dessen wesentlicher Bestandteil eine Cellular-Neural-Networks(CNN)-Kamera ist. Die dabei zugrunde liegende CNN-Technologie erlaubt es, eine paralleladressierbare Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD)-Prozessor-Architektur direkt in die elektronische Schaltung einer CMOS-Kamera zu integrieren (siehe Kasten Seite 74). Das Ergebnis ist eine Kamera, bei der jedes Pixel einen eigenen Prozessor hat.

Mit einer solchen CNN-Kamera ist eine Echtzeit-Verarbeitung von bis zu 10 000 Bildern pro Sekunde mit einer Auflösung von 176 x 144 Pixeln möglich. Die

Belichtungszeit – und damit die Grenze für scharfe Aufnahmen – beträgt rund 10 µs. Im Vergleich zu normalen Zeilenkameras entspricht das mehr als einer Million Zeilen pro Sekunde. In der Praxis sollten sich zwei aufeinanderfolgende Bilder etwa zur Hälfte überdecken. Damit bleiben immer noch 500 000 Zeilen pro Sekunde mit einer Auflösung von 144 Pixeln übrig. Das genügt vollkommen. Herkömmliche Bildverarbeitungssysteme zeichnen in der gleichen Zeit maximal ein Fünftel der Zeilenzahl auf. Genau das ist der zentrale Vorteil des Inline-Drahtinspektionssystems.

System individuell anpassbar

Für die Inspektion von sich bewegenden Oberflächen muss die Optik eines Bildverarbeitungssystems viele Kriterien erfüllen. Erstens müssen Fehler kontrastreich und so hell dargestellt werden, dass die Belichtungszeit kurz genug gewählt werden kann, um störende Bewegungsunschärfe zu vermeiden. Zweitens muss sowohl die Tiefenschärfe als auch die optische Auflösung so groß sein, dass der kleinste relevante Fehler gerade noch scharf abgebildet werden kann, und zwar im gesamten Messvolumen.

Das setzt kleine Blendenöffnungen voraus, die allerdings im Widerspruch zu kurzen Belichtungszeiten stehen. Drittens sind insbesondere auf unebenen

Literatur

- 1 Flynn, M.: Some Computer Organizations and Their Effectiveness, IEEE Trans. Comput., Vol. C-21 (1972), pp. 948
- 2 Chua, L.O.; Yang, L.: „Cellular Neural Networks: Theory“, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 35, No. 10, Oct. 1988
- 3 Blug, A.; Jetter, V.; Strohm, P.; Carl, D.; Höfler, H.: High power LED lighting for CNN based image processing at frame rates of 10 kHz. Proceedings IEEE 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA 2010), 3–5 Feb. 2010, Berkeley, CA, USA.
- 4 Blug, A.; Abt, F.; Nicolosi, L.; Carl, D.; Dausinger, F.; Höfler, H.; Tetzlaff, R.; Weber, R.: Closed Loop Control of Laser Welding Processes using Cellular Neural Networkcameras: Measurement Technology. Paper 1504, Proc. of 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2009), 2009, Orlando, Florida, USA

Autoren

- Andreas Blug**, geb. 1968, Projektleiter FlexFormCNN;
- Dr. Daniel Carl**, geb. 1976, Gruppenleiter Inline-Messtechnik;
- Andreas Hofmann**, geb. 1968, Neue Technologien und Patente und
- Holger Kock**, geb. 1970, Leiter Neue Technologien und Patente am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg.
- Bernhard Blug**, geb. 1972, ist Projektleiter FlexFormCNN am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Kontakt

Andreas Hofmann
T 0761 8857-136
Andreas.Hofmann@ipm.fraunhofer.de
Halle 1, Stand 1502

www.qm-infocenter.de

Diesen Beitrag finden Sie online unter der Dokumentennummer: **QZ110381**

CNN-Kamera

Bei herkömmlichen Bildverarbeitungssystemen – in diesem Fall wären das Zeilenkameras – müssten für eine optische Auflösung von $50\ \mu\text{m}$ bei einem Vorschub von $10\ \text{m/s}$ mehr als 200 000 Zeilen pro Sekunde aufgenommen werden. Dafür gibt es weder geeignete Kameras noch passende EDV-Systeme. Gebräuchliche Computersysteme mit Ausnahme von FPGAs sind in der Regel sogenannte Single-Instruction-Single-Data (SISD)-Architekturen [1]. In SISD-Architekturen besteht ein Programm aus einer Reihe von Anweisungen, die nacheinander von einem oder wenigen Prozessorkernen auf einzelne Datenelemente angewendet werden. Deshalb liegt die Ausführungszeit in der Größenordnung von N oder N^2 , wobei N die Anzahl der Pixel ist.

Eine Alternative sind sogenannte Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD)-Computing-Architekturen, in denen jede Anweisung eines Programms parallel auf eine große Anzahl von Daten angewendet wird. Solche SIMD-Architekturen sind besonders effizient für Bildverarbeitungsaufgaben, bei denen die gleichen Rechenoperationen sehr häufig auf verschiedene Bildpixel angewendet werden müssen. In SIMD-Systemen werden gleiche Rechenvorgänge gleichzeitig in einem einzigen Schritt ausgeführt – eben pixelparallel. Cellular Neural Networks (CNN) – ursprünglich erfunden von Chua und Yang [2] – erlauben es, Computing- und Speicherelemente einer SIMD-Architektur direkt in CMOS-Kamerapixel zu integrieren. Solche CNN-Kameras bestehen aus räumlichen Anordnungen von lokal angeschlossenen, nichtlinear dynamischen Einheiten – den Zellen. Zusätzlich zum CMOS-Fotosensor enthält jede dieser Zellen Speicher- und Rechenelemente sowie Schaltungselemente für die Ein- beziehungsweise Ausgabe der Ergebnisse.

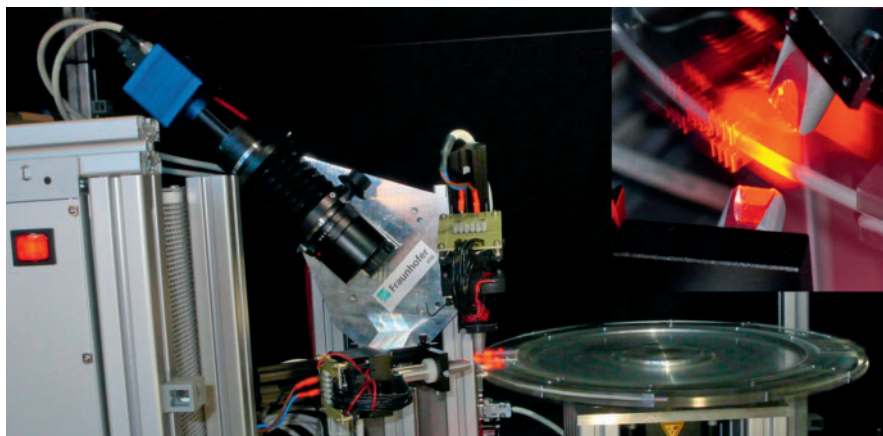


Bild 2. Prüfaufbau: Die Draht-Testproben sind am Rand einer rotierenden Scheibe montiert (rechts unten im Bild). Zwei speziell an die CNN-Kamera angepasste LED-Beleuchtungseinheiten arbeiten gepulst mit bis zu 10 kHz.

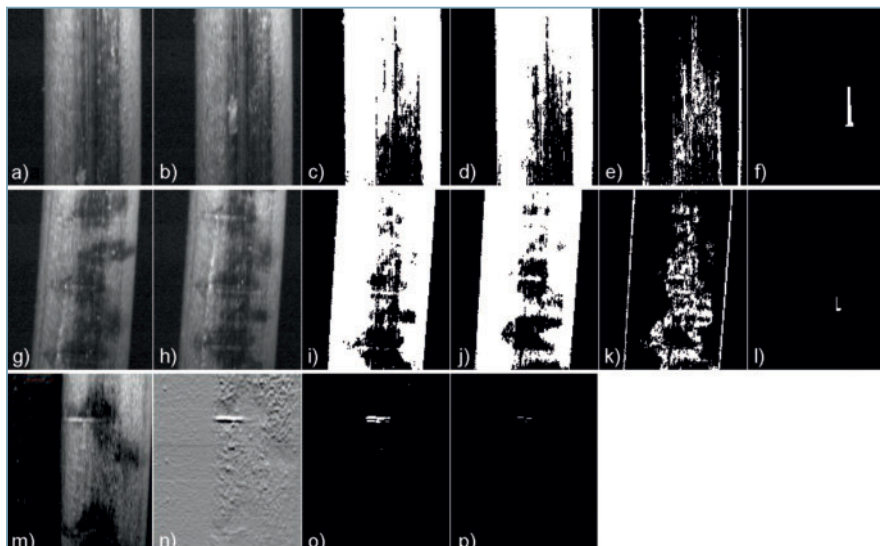


Bild 3. Drahtoberflächen: Das System erkennt unterschiedliche Fehler. In der 1. Zeile sind Ziehriefen dargestellt, in der 2. Zeile Rattermarken und in der 3. Zeile Querriefen senkrecht zum Vorschub.

metallischen Oberflächen Spiegelungen zu vermeiden, damit die Intensität auf der Objektoberfläche homogen verteilt ist.

Schon diese drei wichtigsten Kriterien lassen deutlich werden, wie entscheidend die richtige Beleuchtung für die Leistung einer Bildverarbeitung bei sich bewegenden Objekten ist. Zum Einsatz kommt deshalb pro Kamera eine optimierte, zweikanalige LED-Dunkelfeldbeleuchtung, die die Belichtungszeit trotz einer relativ kleinen Blendenöffnung von $f = 11$ auf $10\ \mu\text{s}$ verkürzt. Mit diesen Belichtungsparametern wird die benötigte optische Auflösung von unter $50\ \mu\text{m}$ im gesamten Messvolumen von $5 \times 4 \times 3\ \text{mm}^3$ erreicht. In Bild 1 ist der Messaufbau skizziert, mit dem ein Viertel der Drahtoberfläche überwacht werden kann.

Das Foto in Bild 2 zeigt den Messaufbau in Kombination mit einem am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg und Halle/S., entwickelten Versuchsaufbau. In diesem wird ein Draht so aufgespannt, dass die Bedingungen eines realen Drahtzuges unter anwendungsnahen Bedingungen nachgestellt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, im Labor Drahtgeschwindigkeiten von bis zu $50\ \text{m/s}$ zu erreichen. Die gepulste Beleuchtung – zu erkennen im kleinen Bildausschnitt – ermöglicht Bildaufnahmen mit Abtastraten von bis zu $10\ \text{kHz}$ bei Belichtungszeiten von $10\ \mu\text{s}$.

Mit diesem Aufbau wurde die Oberfläche von Draht-Testproben aus einem trockenen Aluminium-Ziehprozess un-



tersucht, das heißt ohne Schmierstoffe. Die Draht-Testproben stammen von einer Stelle, an der der Drahtdurchmesser von etwa 3,6 mm auf 3,3 mm reduziert wird, und zwar bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/s.

Fehler sicher erkennen

Das Inline-Draht-Inspektionssystem kann unterschiedliche Oberflächenfehler so schnell und so sicher erkennen, dass die Regelung des Drahtziehprozesses in Echtzeit gelingt.

Bild 3 zeigt beispielhaft drei unterschiedliche Fehlertypen, die beim Ziehen auf der Drahtoberfläche entstehen können, und in welcher Form diese durch die Auswertelgorithmen vom System bearbeitet werden:

- Ziehriefen entstehen durch verschlissene Ziehsteine (obere Bildreihe): Dargestellt sind zwei zeitlich aufeinanderfolgende Bilder (a, b) mit den dazugehörigen Schwellenwert-Bildern (c, d), dem XOR-Bild (e) und dem Endergebnis des ersten Algorithmus (f).
- Rattermarken entstehen durch Resonanzschwingungen im System (mittlere Bildreihe): Dargestellt sind zwei zeitlich aufeinanderfolgende Bilder (g, h) mit den dazugehörigen Schwellenwert-Bildern (i, j), dem XOR-Bild (k) und dem Endergebnis der Bildverarbeitung (l).

- Querriefen senkrecht zum Vorschub sind die kritischsten Oberflächenfehler, da sie während der Umformung Scherspannungen erzeugen, die zum Reißen des Drahts führen können (untere Bildreihe): horizontale Kerbe (m), Ergebnis nach einer horizontalen Kanten-Filterung (n), Schwellenwert-Bild nach Kanten-Filterung (o) und Endergebnis des zweiten Algorithmus (p). Vergleicht man die Bilder nach der Auswertung (die Bilder in den Zeilen ganz rechts), sieht man die charakteristischen Ergebnisse, die schon nach nur etwa 40 bis 60 μ s für eine Prozessregelung zur Verfügung stehen.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu bedenken, dass das größte Problem für die industrielle Anwendung nicht ein übersehener Fehler ist. Viel schwerwiegender sind fälschlicherweise erkannte Defekte auf tatsächlich fehlerfreien Drahtoberflächen. Um dies zu vermeiden, wurden kombinierte Auswertestrategien entwickelt. Doch selbst mit diesen komplexen Algorithmen sind immer noch Bildraten von fast 6 kHz möglich – bei Weitem ausreichend für den Aufbau einer Drahtziehmaschine im Sinne einer Null-Fehler-Produktion.

Idee für viele Lösungen

Der Prozess des Kaltdrahtziehens steht stellvertretend für viele Inspektionsaufga-

ben aus der Industrie, die mit bisher auf dem Markt erhältlichen Bildverarbeitungssystemen unlösbar waren. Ein Inspektionssystem wie FlexFormCNN mit seiner extrem schnellen CNN-Kamera kann in vielen unterschiedlichen Fällen die bessere Lösung sein. So gelang zum Beispiel mit einer CNN-Kamera auch schon die Regelung von Laserschweißprozessen [3, 4]. Dort ging es nicht darum, einzelne Fehler zu detektieren; stattdessen wurde der Prozess als solcher auf die Größe des Durchschweißlochs geregelt, und zwar mit einer Bildrate von über 10 kHz.

Die Beispiele zeigen: CNN-Kamera-basierte Inspektionssysteme spielen besonders bei sehr schnellen industriellen Bildverarbeitungsaufgaben ihre Vorteile aus. Vor allem dann, wenn eine Bilddatenverarbeitung in Echtzeit notwendig ist und herkömmliche Systeme versagen. In diesem Grenzbereich der gerade noch möglichen Bildverarbeitung müssen jedoch sowohl die Algorithmen als auch die Hardware sehr exakt an die jeweilige Aufgabe angepasst werden.

Die dafür notwendige Vorlauforschung wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWM im Rahmen des Projekts „FlexFormCNN – Flexible Steuerung von Umformprozessen mit Cellularen Neuronalen Netzen“ durch die Baden-Württemberg Stiftung GmbH finanziert. □