

Echtzeit-Objektverfolgung im Rasterelektronenmikroskop

Torsten Sievers

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Abteilung für Mikrorobotik und Regelungstechnik
26111 Oldenburg
<http://www.amir.uni-oldenburg.de>
tsievers@web.de

Abstract: Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Erforschung von Algorithmen zur robusten Echtzeit-Objektverfolgung. Das Ziel ist die kontinuierliche Positionsbestimmung (x, y, φ) eines nanoskaligen Zielobjektes in einem Rasterelektronenmikroskop (REM), um eine automatische Positionierung zu ermöglichen. Die Schlüsselanforderungen an die Algorithmen sind dabei eine hohe Robustheit gegenüber Rauschen und Störobjekten. Zusätzlich ist eine Invarianz gegenüber Skalierung wichtig, weil das Zielobjekt je nach Vergrößerung unterschiedlich skaliert ist. Als übergeordnetes Verfahren werden Aktive Konturen eingesetzt, die je nach Anwendung regionsbasiert oder kantenbasiert minimiert werden. Der regionsbasierte Ansatz wird anhand der Verfolgung eines Kohlenstoffnanoröhrchens (CNT) in einem stark verrauschten Bilddatenstrom validiert. Anschließend wird gezeigt, wie sich der kantenbasierte Ansatz für die optische Kraftmessung an Nanoobjekte einsetzen lässt.

1 Einleitung

Nanoskalige Objekte, also Objekte mit Abmessungen von 10^{-6}m bis 10^{-9}m , sind gegenwärtig von großem Forschungsinteresse [Bus04]. Der Grund besteht in deren einzigartigen elektrischen, magnetischen, thermischen, optischen und mechanischen Eigenschaften, die die Entwicklung einer Vielzahl von neuartigen Produkten, wie z.B. Energiespeicher, superfeine Messspitzen und Displays ermöglichen. Entscheidende Voraussetzung für deren Aufbau ist die kontrollierte Handhabung der einzelnen Komponenten (z.B. (CNT), Nanodrähte (NW)), die im Folgenden als Nanoobjekte bezeichnet werden. Während diese z.B. mit Batch-Verfahren automatisiert hergestellt werden können [ZBA04], ist der Aufbau von Nanosystemen¹ meist nur manuell möglich. Daher ist ein aktuelles Forschungsziel die robotergestützte Handhabung von Nanoobjekten.

Ein besonders geeignetes Werkzeug stellt eine flexible mikroroboterbasierte Handhabungsstation im REM dar [FR97]. Das REM hat sich für die Visualisierung der Handhabung von Mikro- und Nanoobjekten - durch eine Auflösung von wenigen Nanometern, eine hohe

¹Als Nanosysteme werden Systeme bezeichnet, die mindestens eine Komponente mit Abmessungen im Nanometerbereich beinhalten.

Schärfentiefe und kurze Bildeinzugszeiten - als perfekter Sensor erwiesen. Die zentrale Idee ist, dass REM als globalen Sensor einzusetzen, um in Kombination mit Echtzeit-Bildverarbeitungsalgorithmen eine Automatisierung von Nanohandhabungsprozessen zu ermöglichen. Da eine Automatisierung mit einer möglichst hohen Durchsatzrate gefordert ist, muss eine entsprechend hohe Bildrate ermöglicht werden. Zwar ist es möglich mit dem REM Bildeinzugszeiten im Bereich von Millisekunden zu erzielen, der Nachteil ist jedoch, dass die REM-Bilder dann stark verrauscht sind.

2 Regionsbasierte Objektverfolgung

Die Grundidee dieses Ansatzes ist es eine Aktive Kontur (z.B. Polygon oder Spline) einzusetzen, deren Abstand zur Kontur des Zielobjekts in jedem Bild minimiert wird [KWT88],[BI00]. Die Minimierung erfolgt über Energiefunktionen, die die Bildmerkmale (externe Energie) und die Form der Aktiven Kontur (interne Energie) repräsentieren. Im Folgenden Ansatz wird die Kontur einzig in Abhängigkeit von der Grauwertverteilung im Bild minimiert. Um eine hohe Robustheit gegenüber Rauschen zu erzielen, wird ein statistisches Rauschmodell in die Minimierung einbezogen [GR04].

2.1 Energiefunktion

Für die Definition der externen Energiefunktionen werden zwei Annahmen gemacht:

1. Die Wahrscheinlichkeiten für die Grauwerte des Bildes werden durch *eine* Wahrscheinlichkeitsverteilung für das gesamte Bild beschrieben.
2. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z.B. Mittelwert und/oder Standardabweichung) sind für die zu unterscheidenden Regionen unterschiedlich.

Dieses Bildmodell wird auch als *Statistical Independent Region Model* (SIR-Modell) bezeichnet [RGC99]. Durch die erste Annahme wird vorausgesetzt, dass das Rauschen im Bild nicht von den Bildinhalten abhängt. Da dies für REM-Bilder zutrifft, ist diese Annahme zulässig. Durch die zweite Annahme wird sichergestellt, dass ein für die Segmentierung notwendiges Kriterium definiert werden kann. Welche Wahrscheinlichkeitsverteilung die Grauwerte des Bildes beschreibt, hängt vom eingesetzten Bildsensor ab und ist für das Modell unerheblich. Die Verteilung der Grauwerte in einem REM-Bild wird durch eine Poisson-Verteilung beschrieben [Rei98].

$$P(x) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \delta(x - n) e^{-p} \frac{p^n}{n!} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet δ die Dirac-Funktion und der Parameter p steht für den Erwartungswert. Für die Menge der Parameter μ einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung

$P(x, \mu)$ ist zu einer gegebenen Menge von Pixeln s eine *maximum-likelihood*-Abschätzung $\hat{\mu}$ definiert. Dies sind die Werte, die die Verbundwahrscheinlichkeit aller Pixel (mit Grauwert x) in s (gemäß der angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung) maximieren:

$$\hat{\mu}(s) = \arg \max_{\mu} L(s|\mu) = \arg \max_{\mu} \prod_{x \in s} P(x|\mu) \quad (2)$$

Dabei steht L für „Likelihood“, also die Wahrscheinlichkeit von s , wenn μ gegeben ist. Bei dem Ausdruck der Verbundwahrscheinlichkeit als Produkt über die Wahrscheinlichkeiten der Pixel wird Annahme (i) berücksichtigt.

Wenn ein Bild s durch eine Segmentierung (Aktive Kontur) θ in zwei Regionen a (Zielobjekt) und b (Hintergrund) aufgeteilt wird, lässt sich die (geschätzte) Wahrscheinlichkeit $L_{pseudo}(s, \theta)$ von s berechnen, indem für die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion in a und b jeweils die entsprechenden maximum-likelihood-Abschätzungen $\hat{\mu}_a$, und $\hat{\mu}_b$ eingesetzt werden:

$$L_{pseudo}(s, \theta) = L(a|\hat{\mu}_a, \theta)L(b|\hat{\mu}_b, \theta) \quad (3)$$

dabei gilt: $\int L_{pseudo}(s, \theta) ds \neq 1$. Es wird das $\hat{\theta}(s)$ gesucht, das $L_{pseudo}(s, \theta)$ maximiert:

$$\hat{\theta}(s) = \arg \max_{\theta} L_{pseudo}(s, \theta) = \arg \max_{\theta} (L(a|\hat{\mu}_a, \theta)L(b|\hat{\mu}_b, \theta)) \quad (4)$$

Unter Verwendung von Gl. 2 folgt die zu minimierende Energiefunktion:

$$J_{Poisson}(s, \theta) = N_a f \left(\frac{1}{N_a} \sum_{x \in a} x \right) + N_b f \left(\frac{1}{N_b} \sum_{x \in b} x \right) \quad (5)$$

Ein Algorithmus zur Minimierung von Gl. 5 wird in [Sie07] beschrieben. Um eine hohe Robustheit gegenüber Störobjekten, die sich im Bildvorder- oder hintergrund befinden, zu erzielen, wird die Minimierung auf die möglichen Transformationen des Zielobjekts (Translation, Rotation, Skalierung) beschränkt. Die theoretische Genauigkeit des Verfahrens liegt derzeit bei 1 Pixel.

2.2 Ergebnisse

Das Verfahren wird anhand eines für die Nanohandhabung typischen Experiments validiert, bei dem ein CNT positioniert wird. Um die Robustheit gegenüber Störobjekten zu validieren, wird das CNT durch einen Greifer zu ca. 1/3 verdeckt. In Abb. 1 sind 3 Bilder aus der Sequenz abgebildet und in Abb. 2 ist die x - und y -Position für den Abschnitt der Sequenz dargestellt, indem es zu einer Verdeckung durch den Greifer kommt. Es ist zu erkennen, dass es zu keiner signifikanten Beeinflussung der Position des CNT während der Verdeckung kommt. Die Genauigkeit bleibt auch während der Verdeckung bei einem

Pixel. Eine ausführlichere Betrachtung der Robustheit gegenüber Rauschen ist in [Sie07] beschrieben.

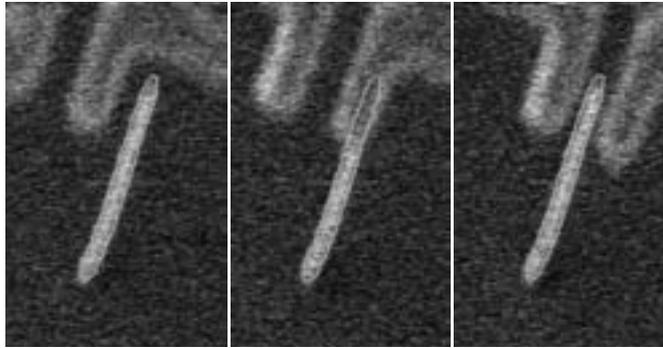


Abbildung 1: Drei Bilder aus einer Sequenz, in der ein CNT (Länge: $8\ \mu\text{m}$) von einem Greifer verdeckt wird. Zur Bildaufnahme wird ein LEO 1450 in Verbindung mit dem externen Rastergenerator DISS 5 von Point Electronic eingesetzt.

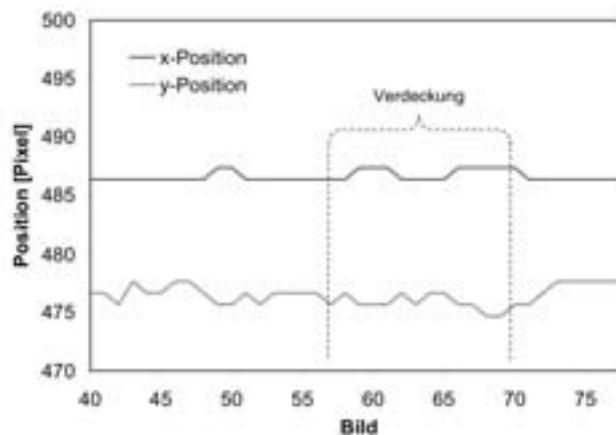


Abbildung 2: Position des CNT während der Verdeckung durch den Greifer.

Die Validierung der Echtzeitfähigkeit erfolgt ebenfalls mit einer Testsequenz. Die beiden Parameter, von denen die Rechenzeit primär abhängt, sind die Größe der Region-of-Interest (ROI, Rasterbereich des REM) und die Länge der Aktiven Kontur (des Polygons). Je größer die ROI, desto mehr Rechenoperationen sind notwendig. Die Berechnung der externen Energie wird mit zunehmender Polygonlänge zeitintensiver. Neben der Rechenzeit hängt auch die Bildeinzugszeit des REM von der Größe der ROI ab und ist damit für jede Größe zu berechnen. Innerhalb der Sequenz wird die Vergrößerung des REM variiert, wodurch eine Skalierung von ROI und Polygon erreicht wird. Für jedes Bild der Sequenz wird die Rechen- und die Bildeinzugszeit gemessen. In Abb. 3 ist das Ergebnis der Per-

formanzmessung für die Testsequenz dargestellt. Im Mittel dauert es 7 mal länger ein Bild einzuziehen, als die Position zu berechnen. Für ROIs ab einer Größe von ca. 700 x 700 Pixel unterscheiden sich die Zeiten um mehr als das zehnfache.

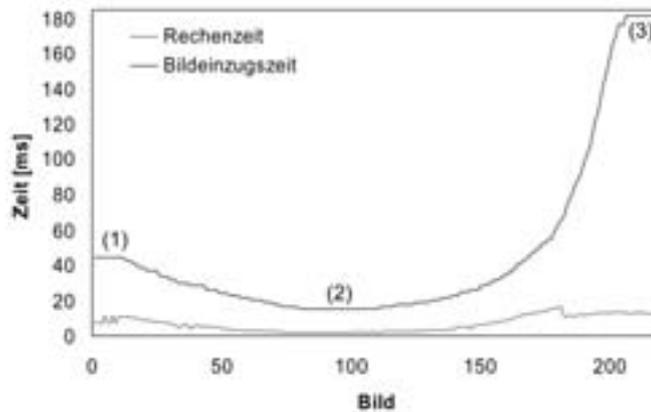


Abbildung 3: Die Rechenzeit im Vergleich zur Bildeinzugszeit. Während der Bildsequenz wird die Vergrößerung des REM und damit die Skalierung von Polygon und ROI variiert. Zu Beginn der Sequenz beträgt die ROI-Größe 397 x 451 Pixel (1), die minimale Größe ist 243 x 254 Pixel (2) und am Ende der Sequenz beträgt die Größe der ROI 766 x 922 Pixel (3). Die Anzahl der Polygonsegmente beträgt 100. Hardware: Standard-PC mit Intel Core2 Duo Prozessor mit 2,4 GHz Taktfrequenz.

3 Optische Kraftmessung

Neben der kontinuierlichen Positionsbestimmung von Nanoobjekten und -werkzeugen ist die Gewinnung von Kraftinformationen ein weiterer wichtiger Faktor für die Automatisierung von Nanohandhabungsprozessen. Rasterkraftmikroskope stellen eine wichtige Gruppe von Kraftsensoren für die Mikro- und Nanotechnologie dar. Bei Kräfteinwirkung wird deren Verbiegung mittels Lasertriangulation oder piezoresistiv gemessen. Das genauere Lasertriangulationsverfahren erfordert einen komplexen und kostenintensiven Aufbau und ist daher im REM sehr aufwendig. Die Standardsensoren für Kraftmessungen im REM sind zurzeit piezoresistive Kantilever [TLWS98]. Sie sind teurer in der Herstellung und erfordern eine aufwendige Kalibrierung, um genaue Kraftmessungen durchzuführen. Ein weiterer Nachteil von derzeit erhältlichen Kantilevern ist deren Größe², die eine Kraftmessung an Nanoobjekten erschwert.

Eine elegante Methode ist die Berechnung der Kraft mittels Bildverarbeitung, im Folgenden als optische Kraftmessung bezeichnet [WAO01], [GN04]. Dabei wird, unter Einbeziehung eines mechanischen Modells, aus der Verbiegung des Objekts die einwirkende Kraft berechnet. Der Vorteil besteht darin, dass die Kraftmessung ohne zusätzliche Hardware durchgeführt werden kann. Im REM entfällt außerdem ein zeitaufwendiges Positionieren

²z.B. Kantilever der Firma Nascatec: $l \cdot b \cdot h = 500 \cdot 160 \cdot 8 \mu\text{m}^3$

des Kraftsensors.

3.1 Mechanisches Modell

Um die Kraft aus der Verformung eines Objekts zu berechnen, ist ein mechanisches Modell erforderlich. In der Elastostatik ist der Zusammenhang zwischen einer einwirkenden Kraft F und der daraus resultierenden Auslenkung $w(x)$ an der Stelle x eines einseitig verankerten Balkens der Länge l definiert als [Bru02]:

$$w(x) = \frac{F \cdot l^3}{E \cdot J} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right\} \quad (6)$$

Darin sind E und J Materialparameter, wobei mit E der Elastizitätsmodul und mit J das axiale Trägheitsmoment bezeichnet wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Gl. 6 eine Näherung darstellt, die für kleine Auslenkungen gilt. Nur dann hängt w linear von F ab. Die Größe des linearen Bereichs hängt vom Material ab. Für Silizium gilt Gl. 6 für elastische Verformungen, also für einen großen Auslenkungsbereich [GN04]. Der Materialparameter J ist abhängig von der Geometrie des Balkens.

Für einen kreisrunden Balken mit Durchmesser d gilt:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (7)$$

Für kleine Auslenkungen ($x = l$) vereinfacht sich Gl. 6 zu:

$$F(w_l) = 3 \cdot \frac{E \cdot J \cdot w_l}{l^3} \quad (8)$$

Um die Kraft zu berechnen ist die einzige zu messende Größe die Auslenkung w_l .

3.2 Objektverfolgungsalgorithmus

Um in einem Bild die Auslenkung w_l eines Balkens an der Stelle l zu bestimmen, muss der Punkt $w(0)$ an dem der Balken eingespannt ist und der Punkt $w(l)$ gemessen werden. Eine Verfolgung dieser Punkte ist schwierig, da sie keine besonderen Merkmale darstellen. Die zentrale Idee ist es daher, den Balken mit einer Aktiven Kontur zu modellieren. Da alle Punkte der Aktiven Kontur bekannt sind, also auch w_l und w_0 , wird durch die Verfolgung des Balkens eine kontinuierliche Bestimmung dieser Parameter erreicht. Für die Minimierung der Aktiven Kontur wird das kantenbasierte Verfahren aus [BI00] eingesetzt. Die Kontur des Zielobjekts wird mittels einer zweidimensionalen Spline-Kurve parametrisiert.

$$\mathbf{r}(s) = (x(s), y(s)) \quad (9)$$

Dabei bezeichnen $x(s)$ und $y(s)$ B-Splines, wobei $x(s)$ definiert ist als:

$$x(s) = \sum_{n=0}^{N_B-1} q_n B_n(s) \quad (10)$$

Für $y(s)$ gilt eine entsprechende Definition. In Gl. 10 bezeichnet $B_n(s)$ die n -te Basisfunktion und q_n die zugehörigen Gewichtungsfaktoren. Die Form der B-Spline lässt sich über eine Modifikation der Gewichte variieren. Damit die Kontur ein Zielobjekt verfolgt, ist es erforderlich die Distanz zur Objektkontur kontinuierlich zu messen. Zur Abstandsmessung werden Messlinien eingesetzt, die senkrecht zur Spline und mit äquidistantem Abstand angeordnet sind (siehe Abb. 4). Der Abstand zwischen Splinekurve und der Kontur des Zielobjektes ist definiert als:

$$\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_f\|_{\bar{\mathbf{n}}} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\mathbf{r}_f(s_i) - \mathbf{r}(s_i)) \cdot \bar{\mathbf{n}}(s_i)]^2 \quad (11)$$

Die Minimierung wird unter Berücksichtigung der Euklidischen Transformationen (Shape Space) durchgeführt, um Translationen, Rotationen und Skalierungen des Zielobjektes zu verfolgen. Zusätzlich ist es erforderlich, die durch die Krafteinwirkung entstehenden Deformationen zu berücksichtigen. Dafür wird der Transformationsraum um einen Keyframe erweitert. Keyframes sind Kontrollvektoren, die Zustände des Zielobjektes modellieren, welche nicht über einen Shape Space erfasst werden. Die Vorteile bestehen darin, dass auch die Zwischenzustände des Objekts linear interpoliert bzw. extrapoliert werden können. Da auch für die Deformationen ein linearer Zusammenhang besteht (Gl. 6), lassen sich Keyframes für die Verfolgung dieser Deformationen einsetzen. Nachdem ein Template von der Kontur des Zielobjektes im Zustand ohne Krafteinwirkung angelegt wurde, wird der zugehörige Keyframe unter Verwendung des mechanischen Modells berechnet. Die Berechnung der Auslenkung erfolgt vektoriell aus den auf der Aktiven Kontur liegenden Punkten w_0 und w_l .

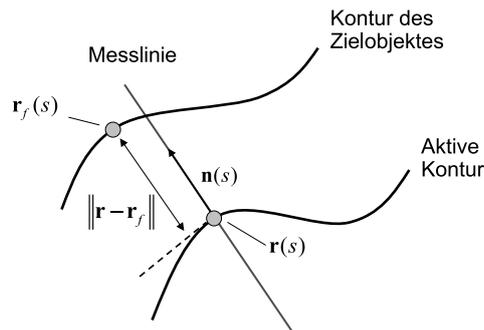


Abbildung 4: Abstandsmessung zwischen Aktiver Kontur und der Kontur des Zielobjektes.

3.3 Ergebnisse

Das Verfahren wurde mit zwei Experimenten verifiziert. Das erste Experiment beinhaltet eine Vergleichsmessung mit einem piezoresistiven Kantilever und ist in [Sie07] beschrieben. Beim zweiten Experiment handelt es sich um die Charakterisierung einer, durch elektronenstrahlinduzierte Abscheidung (EBiD) erzeugten, Verbindung zwischen einem Silizium-Nanodraht und einer AFM-Spitze. Die Abscheidung erfolgte im REM (Zeiss DSM 950) unter Verwendung des Elektronenstrahls. Mittels Bildverarbeitung werden anschließend die auf die Verbindung ausgeübten Kräfte gemessen. Die zu berechnenden Kräfte werden benötigt, um die Biegefestigkeit der Lötstelle zu bestimmen und diese damit zu charakterisieren. Eine Beschreibung des EBiD-Verfahrens und die Charakterisierung der Verbindungen erfolgt in [WSF06].

Die für die optische Kraftmessung notwendige Auslenkung des Nanodrahts wird mit dem Greifer ausgeführt, der während des Lötvorgangs den Draht fixiert. Die Kontur des Nanodrahts wird durch eine Spline mit 13 Kontrollpunkten modelliert. Zur Messung werden 52 Messlinien mit einer Länge von 40 Pixeln eingesetzt. Für die Kantendetektion wird ein Matched-Filter verwendet. Pro Bild werden 31 ms für die Berechnung der Kraft benötigt. Die Bildeinzugszeit beträgt 45 ms. Die der Kraftmessung zugrunde liegenden Materialparameter sind in Gl. 1 aufgeführt.

	d	J	E	l
Mittelwert	0,47 μm	$2,39 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^4$	160 GPa	36 μm
Fehler	0,05 μm	$1,02 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^4$	30 GPa	1 μm

Tabelle 1: Materialparameter des Si-Nanodrahtes.

In diesem Experiment sind die Materialparameter nicht genau bekannt, also fehlerbehaftet und werden daher bei der Berechnung der Messgenauigkeit durch Einbeziehung der Fehlerfortpflanzung berücksichtigt. Der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Messgenauigkeit ist in diesem Fall der Durchmesser des Nanodrahtes d , da dieser Parameter mit der vierten Potenz in die Berechnung des axialen Trägheitsmomentes eingeht (Gl. 7). Im Allgemeinen können die geometrischen Abmessungen von Objekten im REM bis zur Auflösungsgrenze (wenige nm) vermessen werden. Der relativ große Fehler für d resultiert bei diesem Experiment aus dem inhomogenen Durchmesser des Nanodrahtes. Eine weitere fehlerbehaftete Größe ist der Elastizitätsmodul. Es ist zwar bekannt, dass der Nanodraht aus kristallinem Silizium besteht, jedoch ist die genaue Kristallstruktur unbekannt. Da E für kristallines Silizium zwischen 130 GPa und 190 GPa liegt, wird mit dem Mittelwert gerechnet. Die Länge des Nanodrahts l kann mit dem REM genau gemessen werden und ist daher für die Genauigkeit der Kraftmessung nicht signifikant. Um einen Fehler für $w(l)$ zu bestimmen, wird für eine Sequenz von 100 Bildern die Standardabweichung der mittleren Auslenkung $\sigma_w = 390$ nm berechnet und als Fehler angenommen. Damit ist die Auflösung bei dieser Vergrößerung auf 9 nN beschränkt. Unter Berücksichtigung der

Fehlerfortpflanzung ergibt sich für die Kraft F ein Fehler, bzw. eine Genauigkeit von 110 nN. Der Fehler von $w(l)$ hat von allen Parametern den geringsten Einfluss auf den Gesamtfehler. In Abb. 5 ist ein Bild aus der Biegesequenz und die zugehörige Kraftmessung dargestellt.

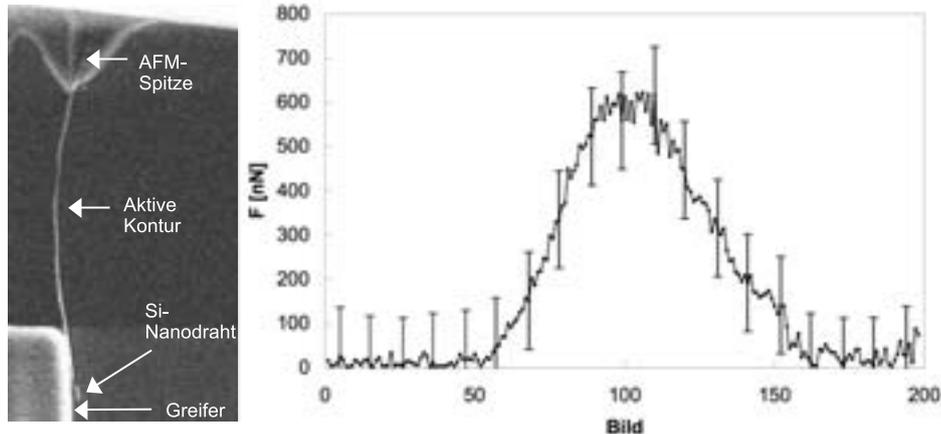


Abbildung 5: Si-Nanodraht (Länge: $36 \mu\text{m}$) und Aktive Kontur während des Biegeexperiments. Die Größe der ROI beträgt 300×600 Pixel. Das Ergebnis der optischen Kraftmessung ist rechts dargestellt. Die Fehlerbalken geben die Genauigkeit an.

4 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Beitrags waren zwei Verfahren, die je nach Anwendung die Verfolgung von Nanoobjekten in einem verrauschten REM-Bilddatenstrom ermöglichen. In beiden Verfahren werden Aktive Konturen als grundlegendes Verfahren eingesetzt. Anhand von zwei Experimenten wurden beide Verfahren validiert. Der regionsbasierte Ansatz wurde zur Verfolgung eines CNT in einer gestörten (Rauschen, Störobjekte) Umgebung eingesetzt. Mit der kantenbasierten Objektverfolgung wurde eine optischen Kraftmessung an einem Nanodraht durchgeführt. Mittels optischer Kraftmessung ist es möglich, Kräfte im nN-Bereich ohne den Einsatz kostenintensiver Hardware zu messen. Darüber hinaus ist das Verfahren ideal geeignet, um Kraftmessungen bei Nanomanipulationen durchzuführen, da eine Messung direkt im REM und in Echtzeit durchgeführt werden kann. Beide Verfahren stellen in Verbindung mit einem REM einen visuellen Sensor zur Verfügung, der eine Automatisierung von Nanohandhabungen ermöglicht.

Literatur

[BI00] A. Blake und M. Isard. *Active Contours*. Springer, 2000.

- [Bru02] O.T. Bruhns. *Elemente der Mechanik II - Elastostatik*. Shaker Verlag, 2002.
- [Bus04] B. Bushan. *Handbook of Nanotechnology*. Springer, 1. Auflage, 2004.
- [FR97] S. Fatikow und U. Rembold. *Microsystems Technology and Microrobotics*. Springer, 1997.
- [GN04] M. A. Greminger und B. J. Nelson. Vision-Based Force Measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(3):290–298, March 2004.
- [GR04] F. Goudail und P. Réfrégier. *Statistical Image Processing Techniques for Noisy Images*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004.
- [KWT88] M. Kass, A. Witkin und D. Terzopoulos. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1:321–331, 1988.
- [Rei98] L. Reimer. *Scanning Electron Microscopy - Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer, 1998.
- [RGC99] P. Réfrégier, F. Goudail und C. Chesnaud. Statistically Independent Region models applied to correlation and segmentation techniques. In *Proc. of Euro-American Workshop on Optoelectronic Information Processing*, Seiten 193–224, 1999.
- [Sie07] Torsten Sieves. Real-time object tracking inside an SEM. In S. Fatikow, Hrsg., *Automated Nanohandling by Microrobots*, Kapitel 4, Seiten 103–127. Springer, 2007.
- [TLWS98] M. Troyon, H.N. Lei, Z. Wang und G. Shang. A Scanning Force Microscope combined with a Scanning Electron Microscope for Multidimensional Data Analysis. *Scanning Microscopy*, 12(1):139–148, 1998.
- [WAO01] X. Wang, G.K. Ananthasuresh und J.P. Ostrowski. Vision-based sensing of forces in elastic objects. *Sensors and Actuators A-Physical*, 94(3):142–156, 2001.
- [WSF06] T. Wich, T. Sievers und S. Fatikow. Assembly inside a Scanning Electron Microscope using Electron Beam induced Deposition. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2006.
- [ZBA04] B. Ziaie, A. Baldi und M.Z. Atashbar. Introduction to Micro/Nanofabrication. In B. Bushan, Hrsg., *Springer Handbook of Nanotechnology*, Kapitel 5, Seiten 147–184. Springer, 2004.



Torsten Sievers studierte von 1997 bis 2002 Physik an der Carl von Ossietzky Universität in Oldenburg. Seine Diplomarbeit verfasste er auf dem Gebiet der optischen Messtechnik. Anschließend wechselte er in die Abteilung für Mikrorobotik und Regelungstechnik des Departments für Informatik und forschte dort an Themen der Bildverarbeitung mit dem Schwerpunkt Objektverfolgung im Rasterelektronenmikroskop. Im Rahmen von DAAD Projekten forschte er als Gastwissenschaftler an der Helsinki University of Technology und der Université de Montréal. Seit Abschluss seiner Dissertation im Jahr 2007 arbeitet Torsten Sievers im Forschungszentrum der Carl Zeiss AG in Oberkochen im Bereich Bildverarbeitung.

vers im Forschungszentrum der Carl Zeiss AG in Oberkochen im Bereich Bildverarbeitung.