

Design and Control of Sensor-Guided Nanorobots

Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Markus Brunner
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born February 22, 1971
citizen of Laupersdorf, Switzerland

accepted on recommendation of
Prof. Dr. A. Stemmer, examiner
Prof. Dr. H. Bleuler, co-examiner

Zurich, 2000

Abstract

Today, many research and development areas experience a tremendous growth due to the use of micro- and nanotechnology. Fields like design of integrated circuits, biology or medicine benefit from technological achievements and methods from micro technique. Current research fields also gain profound knowledge applying new visualization tools that allow a closer look in the nano world. Together with these new methods for analysis a strong demand to enter not only passively but actively in the (sub)micrometer regime is heard. Hence, new ways for manipulation of micro particles are required to form the nano world according to the needs of the application just in hand.

Although nanotechnology offers a lot of possible solutions and methods for a given application, their usage is sometimes rather complicated and needs detailed knowledge. Taking this into account, this thesis starts by picking up known concepts from nanotechnology, robotics and signal processing and bringing them together in a new concept. The presented sensor-guided nanorobot shows a possibility to combine information from the micro and macro world with a-priori knowledge from the user to perform a given task automatically. This task-oriented working principle offers an easier operation and a faster and more flexible data acquisition. This is the first step towards systems that can be integrated in a fully automated environment to work on the small scale.

The presented prototype was designed for the analysis of integrated circuits. For their optimization, data about e.g. the quality of the circuit path or the strength of the electric field along a transistor are required. The sensor-guided nanorobot can acquire such information automatically by letting the user define the properties of the structure under investigation, e.g. its width or the electric potential as well as the approximate point for starting the analysis. After that, the system searches for the exact position of the structure of interest and tracks along it. For this purpose the system uses a tip that is also applied in an atomic force microscope to gather local information like topography or surface potential. These signals contain information about the structure. A control loop processes this information in real-time and decides afterwards where to go next.

Due to the fact that signals from the nano world are sensitive and often noisy compared to information from the macro world, the already found positions of the structure are stored and interpolated to a trajectory. Hence, the control loop gets more stability by considering not only the actual data, but also the past path trajectory. Further, a video camera is used as additional sensor to guide the local probe at critical points like bendings or junctions, at which local information alone often is not sufficient.

The presented concept can be easily expanded and adapted to other applications due to the modular setup. Another field could be e.g. the automatic search of micro objects and their picking afterwards. To do this, a new generation of micro manipulators is presented. The gripper is based on a glass pipette to manipulate objects with sizes $>10\ \mu\text{m}$. An integrated distance sensor allows one to measure the actual spacing between tool tip and environment. With such intelligent tools on the one hand local properties of the sample can be acquired and on the other hand manipulations can be performed, too. Complemented with the presented concept of a sensor-guided nanorobot, this is the first step towards robots that can build up micro structures automatically.

Kurzfassung

Viele Forschungs- und Entwicklungsgebiete erfahren heute durch den Einsatz von Mikro- und Nanotechnologie einen starken Aufschwung. So profitieren z. B. Gebiete wie Schaltungsdesign, Biologie oder Medizin heute von Errungenschaften und Verfahren aus der Mikrotechnik. Auch aktuelle Forschungsgebiete erzielen vertiefte Erkenntnisse durch den Einsatz von neuen Visualisierungswerkzeugen, die den Blick in die Nanowelt ermöglichen. Mit den neuen Analysemöglichkeiten wird auch der Wunsch immer stärker, nicht nur passiv sondern auch aktiv in das Submikrometer Regime einzudringen. Neue Wege für die Manipulation von kleinen Partikel werden gesucht um die Nanowelt nach den Bedürfnissen der gerade vorliegenden Anwendung zu gestalten.

Obwohl die Nanotechnologie für viele Anwendungen mögliche Lösungen und Methoden zur Verfügung stellt, sind deren Einsatz mitunter noch recht umständlich und benötigen grosses Fachwissen. Hier setzt diese Arbeit an, indem sie bestehende Verfahren aus Nanotechnik, Robotik und Signalverarbeitung aufgreift und sie in einem neuen Konzept zusammenführt. Der vorgestellte sensorgeführte Nanoroboter zeigt eine Möglichkeit, Informationen aus der Mikro- und Makrowelt mit Benutzervorwissen zu kombinieren, um eine gestellte Aufgabe automatisch auszuführen. Dieses aufgabenorientierte Funktionsprinzip ermöglicht eine einfachere Bedienung und eine schnellere und flexiblere Datenerfassung. Dies ist ein erster Schritt in Richtung von Systemen, die integriert in eine vollautomatische Umgebung auf dieser kleinen Grössenskala arbeiten können.

Der präsentierte Prototyp wurde auf die Analyse von integrierten Schaltungen ausgerichtet. Für deren Optimierung werden z. B. Daten über die Qualität von Leiterbahnen oder die elektrische Feldstärke entlang von Transistoren benötigt. Der sensorgeführte Nanoroboter kann solche Informationen automatisch erfassen, indem er den Benutzer über die Eigenschaften wie z. B. Breite oder elektrisches Potential der zu untersuchenden Struktur sowie den ungefähren Startpunkt der Analyse befragt. Danach sucht er automatisch die genaue Position der gewünschten Struktur und tastet sich ihr entlang. Hierzu verwendet das System eine Spitze, wie sie auch in Rasterkraftmikroskopen eingesetzt wird, um lokale Informationen, im vorliegenden Fall Topographie und Oberflächenpotential, zu messen. Diese Signale beinhalten Anhaltspunkte über die Struktur. Ein Regelkreis wertet diese Informationen in Echtzeit aus und entscheidet dann über das weitere Fortschreiten.

Da Signale aus der Nanowelt verglichen zu Informationen aus der Makrowelt sehr störanfällig und oft mit Rauschen behaftet sind, werden die bereits gefundenen Positionen der Struktur gespeichert und zu einer Trajektorie interpoliert. Der Regelkreis wird somit stabiler, da er nicht nur die aktuellen Daten zur Entscheidungsfindung verwenden muss, sondern auch auf den früheren Verlauf der Leiterbahn zurückgreifen kann. Ferner wird eine Videokamera als weiterer Sensor verwendet um die Messsonde an kritischen Stellen wie Knicke oder Verzweigungen, an denen lokale Informationen alleine oft nicht ausreichen, sicher weiterzuführen.

Das vorgestellte Konzept kann dank des modularen Aufbaues leicht auf andere Aufgabenstellungen erweitert und angepasst werden. Eine weitere Anwendung könnte z. B. das automatische Finden von Mikroobjekten und das anschliessende Greifen sein. Hierzu wird eine neue Generation von Mikromanipulator vorgestellt. Der Greifer basiert auf einer Glaspipette um Objekte ab einer Grösse von 10 μm zu manipulieren. Ein integrierter Distanzsensor erlaubt das Messen des aktuellen Abstandes zwischen Werkzeugspitze und Umgebung. Mit solchen intelligenten Werkzeugen kann sowohl auf lokale Probeneigenschaften zugegriffen werden als auch Manipulationen vorgenommen werden. Kombiniert mit dem vorgestellten Konzept des sensorgeführten Nanoroboters ist dies ein erster Schritt in Richtung von Robotern, die automatisch Mikrostrukturen zusammenbauen können.