

Doctoral Thesis ETH Zürich No. 21520

# THE FOUR PILLARS OF NANOPositionING FOR SCANNING PROBE MICROSCOPY

A DISSERTATION SUBMITTED TO  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences  
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

TOMAS TUMA

Magister in Computer Science, Charles University in Prague  
born October 26th, 1983  
citizen of the Czech Republic

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. John Lygeros, examiner  
Prof. Dr. Georg Schitter, co-examiner  
Dr. Angeliki Pantazi, co-examiner  
Dr. Abu Sebastian, co-examiner

2013

# Abstract

Scanning probe microscopy (SPM) is a key enabling technology for science and engineering on the nanometer scale. In SPM, control of motion on the nanometer and subnanometer scale down to the size of a single atom, referred to as nanopositioning, plays a pivotal role. This dissertation considers the problem of nanopositioning for SPM, more specifically lateral nanopositioning, and focuses on four key technological elements that form the foundation of a typical feedback control loop in lateral nanopositioning for SPM. These four elements, termed pillars, are the sensor, the scanner, the controller and the scan trajectory.

We first review the existing sensing technologies on the nanometer scale and show that non-contact sensing with subnanometer precision over a high bandwidth remains an open problem in applications where optical interferometry cannot be used, for example because of its form factor and cost. We propose a new displacement transducer that is based on using spintronic magnetoresistive sensors to detect changes in a high-gradient magnetic field at the pole of a micromagnetic dipole. We quantify the resolution of the displacement transducer, introduce a new model for multilayer giant magnetoresistance sensors that are subject to highly non-uniform fields, and present a performance and scalability study. Experimental results demonstrate the resolution of 600 pm over 1 MHz with noise floor of  $0.5 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  and range of more than  $10 \text{ }\mu\text{m}$  which is a remarkable figure given the low cost, small form factor and non-contact nature of the sensor, rendering it comparable to optical transducers at a fraction of their form factor and cost.

We next review the existing SPM scanner designs, most of which are limited by the inherent trade-off between the range of operation and the scan speed. To tackle this issue, we propose a dual-stage scanner design in which two scanners, a short-range scanner and a large-range scanner, are serially linked to decouple the requirements on the scan range and speed. Subsequently, we present a custom-design short-range scanner that is optimized for high-speed operation along a single axis and features electromagnetic actuation to enable highly linear motion and the use of advanced feedback controllers. Experimental results are presented in which the short-range scanner is incorporated in a custom-built dual-stage nanopositioning system that is used for large-range as well as real-time atomic force microscopy (AFM) imaging.

A significant attention is devoted to feedback control for nanopositioning.

We review the large family of control architectures for nanopositioning, including linear and hybrid control schemes, and focus on two control architectures specifically designed for low sensitivity to measurement noise. In one control architecture, we combine a two-degree-of-freedom robust control architecture with an  $\mathcal{H}_\infty$  signal-based control design for shaping of the closed-loop sensitivity to the measurement noise. This control architecture is employed in the dual-stage nanopositioning system described above and used for high-speed AFM imaging. In another control architecture, termed impulsive control, a hybrid feedback controller is used to overcome the limitations of linear feedback control and enable the tracking of high-speed reference signals in AFM. Experimental results are presented in which impulsive control is used to speed up AFM imaging without increasing the sensitivity to measurement noise.

Finally, we elaborate on the problem of scan trajectory design for SPM with a particular focus on novel non-raster scan trajectories that enable high-speed scanning and at the same time, have a narrow spectral bandwidth. First, we introduce the Lissajous scan trajectory that is based on a pattern created by an interference of two single-tone harmonic waveforms over a two-dimensional space. A detailed analysis of the Lissajous scan trajectory properties is provided and experimental results are presented in which Lissajous scan trajectories are used for high-speed multiresolution AFM imaging. Second, we introduce a new framework for the analysis and design of scan trajectories that is based on mathematical optimization and new spatial resolution metrics using Voronoi diagrams. We use the framework to automate the design of Lissajous scan trajectories.

# Zusammenfassung

Die Rastersondenmikroskopie (engl. scanning probe microscopy oder SPM) ist eine Schlüsseltechnologie für Wissenschaft und Technik auf der Nanometerskala. Von entscheidender Bedeutung in SPM ist die genaue Kontrolle von Bewegungen im Nano- und Subnanometerbereich bis hin zur Grössenordnung einzelner Atome, die so genannte Nanopositionierung. Die vorliegende Dissertation befasst sich der Nanopositionierung für SPM, genauer gesagt mit der lateralen Nanopositionierung. Laterale Nanopositionierung beruht auf vier technologischen Elementen oder Säulen: einem Sensor, einem Scanner, einem Regler und den Rasterkurven (engl. scan trajectories). In dieser Dissertation werden diese vier Grundelemente der lateralen Nanopositionierung untersucht. Als erstes wird ein Überblick über verschiedene Sensortechnologien auf der Nanometerskala präsentiert. Ein ungelöstes Problem ist die kontaktfreie Positionsmessung mit Subnanometerpräzision über grosse Brandbreiten, besonders wenn z.B. aufgrund der Formfaktors bzw. der Kosten die Verwendung optischer Interferenzmessverfahren nicht in Frage kommt.

Als mögliche Lösung schlagen wir eine neue Sensortechnologie vor, die mittels spintronischer, magnetoresistiver Sensoren die Veränderungen des Hochgradient-Magnetfelds am Pol eines mikromagnetischen Dipols misst. Die Auflösung dieser Sensoren wird quantifiziert, ein neues Modell für Mehrschicht-GMR-Sensoren in stark variierenden Magnetfeldern vorgestellt und eine Leistungs- und Skalierbarkeitsstudie präsentiert. Experimentelle Ergebnisse zeigen eine Auflösung von 600 pm über 1 MHz bei einem Grundrauschen von  $0.5 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  und einen linearen Operationsbereich von mehr als  $10 \mu\text{m}$ , was angesichts der geringen Kosten und des kleinen Formfaktors äusserst bemerkenswerte Werte für kontaktfreie Sensoren sind.

Als zweites befasst sich diese Dissertation mit den in SPM verwendeten Scannern. Ein grundlegendes Problem der meisten Scanner ist die Notwendigkeit, einen Kompromis zwischen Geschwindigkeit und Scan-Bereich einzugehen. Um dieses Problem zu lösen, schlagen wir ein neues, zweiteiliges (dual-stage) Scanner-Design vor, in dem zwei Scanner, einer für den Nahbereich und einer für längere Strecken, seriell miteinander verbunden werden. Mit dieser Anordnung lassen sich die gegensätzlichen Anforderungen von Scan-Bereich und Geschwindigkeit entkoppeln. Ausserdem präsentieren wir einen selbst entwickelten Nahbereich-Scanner, der speziell für Scannen bei hoher Geschwin-

digkeit entlang einer Achse optimiert ist und dank elektromagnetischer Ansteuerung hochlineare Scanner-Bewegungen und den Einsatz moderner Feedback-Regler erlaubt. Experimenteller Ergebnisse, die mit einem Prototyp über einen grossen Scanbereich sowie in der Echtzeit-Rasterkraftmikroskopie (AFM) erzielt wurden, zeigen das Potential dieses sog. Dual-Stage-Napositionierungssystems auf. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Nanopositionierung sind die Reglersysteme. Wir präsentieren zuerst einen Überblick über Reglerarchitekturen für Nanopositionierung, einschliesslich linearer und hybrider Reglersysteme, und konzentrieren uns anschliessend auf zwei Architekturen, die speziell für geringe Empfindlichkeit gegenüber Messrauschen konzipiert worden sind.

Die erste Architektur verbindet eine robuste Reglerarchitektur mit zwei Freiheitsgraden und ein Reglerdesign auf Basis des  $\mathcal{H}_\infty$ -Frameworks, mit dem die Closed-Loop-Empfindlichkeit auf Messrauschen gestaltet werden kann. Diese Regelarchitektur wird in dem oben beschriebenen Dual-Stage-Scannersystem für Hochgeschwindigkeits-AFM benutzt. In der zweiten Reglerarchitektur, die auf der so genannten impulsiven oder stossartigen Regulierung (engl. impulsive control) beruht, kommt ein hybrider Feedback-Regler zum Einsatz, um die Einschränkungen der linearen Reglersysteme zu überwinden und die extrem schnellen Referenzsignale in AFM erfassen zu können. Experimentelle Ergebnisse werden vorgestellt, in denen diese Art der impulsiven Kontrolle verwendet wurde, um die Bildgebung in AFM zu beschleunigen ohne Erhöhung der Empfindlichkeit auf Messrauschen.

Als viertes und letztes konzentrieren wir uns auf das Problem der SPM-Abtastbahnen (engl. scan trajectories). Hierbei befassen wir uns vor allem mit neuartigen, nicht raster-artigen Kurven, die ein schnelles Abtasten oder Scannen erlauben, jedoch nur eine geringe spektrale Bandbreite aufweisen. Als erstes werden die Lissajous Scan-Kurven eingeführt. Sie kennzeichnet ein regelmässiges Muster, das aufgrund der Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz über einem zweidimensionalen Raum entsteht. Nach einer detaillierten Analyse ihrer Eigenschaften präsentieren wir Experimente, in denen Lissajous-Scan-Kurven für die Bildgewinnung in der multidimensionalen Kraftmikroskopie verwendet wurden. Als zweites stellen wir ein neues Rahmenwerk für Analyse und Design von Abtastkurven vor, das mathematische Optimierung und neue, auf Voronoi-Diagrammen basierende Metriken für die räumliche Auflösung verwendet. Dieses Rahmenwerk verwenden wir anschliessend zur Automatisierung der Gestaltung von Lissajous-Abtastkurven.