

DISS. ETH No. 12318

Multi-Degree-of-Freedom Micropositioning Using Stepping Principles

Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Wolfgang Zesch
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born November 3, 1968
citizen of Austria

accepted on recommendation of
Prof. Dr. G. Schweitzer, examiner
Prof. Dr. R. Y. Siegwart, co-examiner

Zurich, 1997

Abstract

Micro- and nanotechnology is a key issue in today's and tomorrow's development of advanced products. New tools are – and will be – needed to automatically handle and assemble micro-sized structures with sub-micrometer precision, or to give human beings the capability of operating in these tiny dimensions.

This work focuses on the mechanics of micromanipulation. After some basic considerations, the specifications for a high precision robot structure are defined. Among them, one of the most challenging problems is to position a robot extremely accurately (10 nm) within a large workspace (1 cm³), i.e., with a spatial dynamics of 10⁻⁶. The only way to achieve this accuracy is to use direct measurement of the relation between the target object and the microtool used to treat this object. For the mechanical setup, this strategy reduces the problem of accuracy to a problem of resolution. Special attention has to be paid to friction, more precisely, to the stick-slip phenomenon, as it is the main limiting factor for the positioning resolution.

Stepping actuation principles are able to cover the above dynamic range, since they combine both a high resolution and a theoretically infinite workspace. Driven by piezoelectric actuators, these mechanisms are very simple in design and easy to control. Therefore, they are well suited for micropositioning tasks. Two kinds of stepping principles are investigated: The *crawling principle* and the *inertial principle*. Mathematical models are developed which explain the mechanisms behavior. Experiments are performed to verify these models.

In a second part, we discuss in detail the combination of single actuators to **multi-degree-of-freedom mechanisms**. The aim is to provide high resolution motion within a large 3D working range. To avoid compliant, friction-limited designs, we propose parallel manipulators with flexible joints and links. Two different structures with three degrees of freedom each will be investigated: A planar inertial drive for motions on a horizontal tread and an Inchworm driven spatial structure to attain the complementary three degrees of freedom.

In contrast to macro-robotics, the main restrictions to the kinematic configuration of micromanipulators originate from the sensor, i.e., the microscope used to supervise and control handling and assembly processes. Our approach is a **multi-arm robot** able to operate in the limited space under the microscope.

All these developments were implemented and tested within the **ETHZ-Nanorobot System**. Moreover, benchmark tests proved the feasibility. With simple microassembly tasks performed with teleoperation we demonstrated the ability for micromanipulation and future applications. The accuracy of the closed-loop system is evidenced by high precision motions guided by a feedback controller based on computer vision.

Kurzfassung

In der aktuellen und der zukünftigen Entwicklung von Spitzentechnologie spielt die Nano-Technik eine immer bedeutendere Rolle. Hierfür werden geeignete Werkzeuge benötigt, sei es zum Hantieren und Zusammenbauen von mikroskopischen Baugruppen oder, um dem Bediener einen Einblick in die Nanowelt zu geben und ihn zu befähigen, in diesen Grössenordnungen Operationen durchzuführen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Mechanik der Mikromanipulation. Nach einigen grundlegenden Erläuterungen werden die Kriterien für die Entwicklung von hochgenauen Mechanismen behandelt. Zentrale Bedeutung kommt dabei dem Problem der Dynamik zu. Konkret soll der Roboter in einem Arbeitsraum von 1 cm^3 Manipulationen mit einer Genauigkeit von 10 nm ausführen, was einer räumlichen Dynamik von 10^{-6} entspricht. Die einzige Möglichkeit, eine solche Präzision zu erreichen, ist, die Beziehung zwischen Werkstück und Werkzeug direkt zu messen. Diese Strategie führt das Problem einer extremen Positioniergenauigkeit über in die einfachere Frage einer hohen Auflösung. Spezielles Augenmerk ist hierbei auf die Reibung, genauer gesagt, auf den Losreisseffekt, zu legen, da dieser zu einem grossen Teil die Positionierauflösung eines Antriebes bestimmt.

Eine elegante Methode, die oben genannte Dynamik zu erreichen, ist das sogenannte **Schrittprinzip**. Werden piezoelektrische Aktoren verwendet, so bestehen solche Schrittmotoren durch ihre Einfachheit, sowohl im Aufbau als auch in

der Ansteuerung. Dies ist auch der Grund, warum sie für Aufgaben in der Mikropositionierung so geeignet erscheinen. In einem ersten Teil der Arbeit werden zwei derartige Prinzipien untersucht: Der *Kriech-* und der *Trägheitsantrieb*. Zuerst werden mathematische Modelle, die auf starren Körpern und elastischen Aktoren beruhen, hergeleitet und danach im Experiment auf ihre Tauglichkeit hin überprüft.

Ein zweiter Teil behandelt die Kombination von Einzelaktoren zu **Mechanismen mit mehreren Freiheitsgraden**. Das Ziel ist dabei, die hervorragenden Eigenschaften der Schrittantriebe in präzise räumliche Bewegungen umzusetzen. Um die Limitierungen herkömmlicher Roboter aufgrund von Reibung, Spiel und Elastizität zu umgehen, werden parallele Strukturen mit flexiblen Gelenken und Armen verwendet. Dieser Ansatz wird anhand zweier Mechanismen mit jeweils drei Freiheitsgraden demonstriert: Ein ebener Trägheitsantrieb und eine komplementäre räumliche Struktur, die mit Inchworms angetrieben wird.

Im Gegensatz zur Makrowelt spielt bei Mikromanipulationen die Geometrie des Sensors, d.h. des Mikroskops, das zur Prozessüberwachung benötigt wird, eine zentrale Rolle. Wegen der beschränkten Platzverhältnisse unter dem Objektiv wurde in dieser Arbeit darum die Struktur eines **mehrmarmigen Roboters** gewählt.

Zusammen mit den Resultaten anderer Gruppen führten die untersuchten Ansätze und Lösungen schliesslich zum Bau des **ETHZ-Nanoroboters**. Als Testaufgaben für die Telemanipulation dienten einfache Handling- und Fügeoperationen. Desweiteren wird die Genauigkeit des Gesamtsystems mit Hilfe von bildgeregelten Präzisionsbewegungen aufgezeigt. Es werden dabei Werte erreicht, welche die physikalische Auflösungsgrenze des benutzten Mikroskops um mehr als eine Grössenordnung übertrifft.