

Abstract

Modeling and simulation of MEMS devices before their manufacture are essential and can be far more economical than physical prototyping by accelerating the process of the design, reducing the cost of the production and shortening the time to competitive market. As interest in commercial application of MEMS grows, the need for the sophisticated CAD tools grows dramatically. Due to the heavily coupling of the multi-physics, combined with consideration associated with their small dimensions and complex shaped geometries of MEMS, development of CAD for MEMS is inherently complicated and difficult subject and poses significant computational challenges. In this dissertation, we present an innovative and general mathematical framework for the modeling and simulation of MEMS devices.

A complete physical model for a MEMS structure will lead us into continuum mechanics, into electrodynamics, into thermodynamics, into chemistry and finally into all areas of continuum physics. We limit ourselves to the mechanical and electromagnetic energy domains and focus our attention on coupled effects, of which the mechanical-electric effects and mechanical-magnetic effects are the special cases. The physical model for a MEMS structure is consequently regarded as consisting of two submodels. The first one is a dynamic mechanical submodel describing the mechanics of the elastic deformation structure. The second one is an electromagnetic submodel describing the dynamics of the electromagnetic influence within a MEMS structure. These two submodels are mutually coupled. We follow the line of Lagrangian formalism to build up the proposed framework for a MEMS structure. The Lagrange formalism determines the model for a dynamic system through a variation principle applied to the proposed Lagrangian which stands de facto for the

0 Abstract

energy functions of the system. Our framework captures the physical behavior due to dynamic electromagnetic and mechanical interactions. This framework is comprehensive and extensible. It can be extended further to track other energy domains and generate a complete physical model for multi-physical domains MEMS devices. Additionally, it makes it possible to apply a consistent discretization technique and simplify our work for the implementation.

As the system undergoes some motion and deformation, the various material elements of the system are carried into new configuration positions. Simulation of the model demands a self-consistent solution of the coupled elastomechanics and electrodynamics equations. In order to avoid the heavy task of the geometry update of the structure under consideration, material coordinate system is employed in the framework we present, in which both analyses including elastomechanical and electrodynamic are performed in the material frame. By the construction of Lagrangians for both submodels in the material frame, a full coupled governing equations of motion is naturally derived through Lagrangian formalism.

A successful implementation of the proposed methodology for MEMS simulation is reported.

Zusammenfassung

Die Modellbildung und Simulierung von MEMS-Bauteilen vor ihrer Fertigung ist notwendig und kann sehr viel wirtschaftlicher sein als die Herstellung eines physikalischen Prototyps. Denn auf diese Weise wird der Gestaltungsprozess beschleunigt, die Produktionskosten verringert und das Produkt kann schneller auf den Markt kommen. Mit zunehmendem Interesse an kommerziellen MEMS-Anwendungen wächst auch die Nachfragen nach hoch entwickelten CAD-Werkzeugen drastisch. Weil die Multi-Physik stark gekoppelt ist mit den kleinen Maßen und den kompliziert geformten Geometrien von MEMS, ist die Entwicklung von CAD für MEMS ein immanent kompliziertes und schwieriges Thema, das eine bedeutende Herausforderung an die Berechnung darstellt. In dieser Dissertation stellen wir ein innovatives und allgemeingültiges mathematisches Rahmenwerk für die Modellbildung und Simulierung von MEMS-Bauteilen vor.

Ein vollständiges physikalisches Modell für eine MEMS-Struktur würde bis in die Kontinuum-Mechanik, die Elektrodynamik, die Thermodynamik, die Chemie und schließlich in alle Bereiche der Kontinuum-Physik führen. Deshalb beschränken wir uns auf die Gebiete der mechanischen und elektromagnetischen Energie und richten unsere Aufmerksamkeit auf gekoppelte Effekte, insbesondere auf mechanisch-elektrische und auf mechanisch-magnetische. Infolgedessen betrachten wir das physikalische Modell für eine MEMS-Struktur als ein Modell, das aus zwei Submodellen besteht. Das Erste ist ein dynamisches mechanisches Submodell, das die Mechanik der elastischen Deformations-Struktur beschreibt. Das Zweite ist ein elektromagnetisches Submodell, das die Dynamik des elektromagnetischen Einflusses innerhalb einer MEMS-Struktur beschreibt. Diese zwei Submodelle sind miteinander gekoppelt. Wir folgen

0 Zusammenfassung

dem Lagrange-Formalismus, um das vorgeschlagene Rahmenwerk für eine MEMS-Struktur aufzubauen. Der Lagrange-Formalismus legt mit Hilfe des Variationsprinzips das Modell für ein dynamisches System fest. Das Variationsprinzip wird bei dem vorgeschlagenen Lagrangian angewendet, das für die Energiefunktionen des Systems steht. Unser Rahmenwerk beinhaltet das physikalische Verhalten aufgrund der dynamischen elektromagnetischen und mechanischen Interaktionen. Dieses Rahmenwerk ist umfassend und erweiterbar. Es kann erweitert werden, um andere Energiegebiete aufzuspüren und ein komplettes physikalisches Modell für MEMS-Bauteile für multi-physikalische Gebiete zu generieren. Außerdem haben die Gleichungen auf unterschiedlichen Energiegebieten eine allgemeine generische Struktur, die es ermöglicht, ein konsistentes Diskretierungsverfahren zu verwenden.

Da das System einiger Bewegung und Deformation ausgesetzt ist, geraten die verschiedenen materiellen Elemente des Systems in neue Konfigurations-Positionen. Die Simulation des Modells verlangt eine selbstkonsistente Lösung der gekoppelten elastomechanischen und elektrodynamischen Gleichungen. Um die schwere Aufgabe des Geometrie-Updates der Struktur zu vermeiden, wird ein materielles Koordinatensystem in unser Rahmenwerk implementiert, in dem sowohl elastomechanische und elektrodynamische Analysen durchgeführt werden. Durch den Aufbau der Lagrangians beider Submodelle wird eine volle gekoppelte Beherrschungsgleichung der Bewegung auf natürliche Weise durch den Lagrange-Formalismus abgeleitet.

Eine erfolgreiche Implementierung der vorgeschlagenen Methodenlehre für MEMS-Simulation wird berichtet.

Chapter 1

Introduction

In this introductory chapter, we give some background of this work, i.e. the general concepts about MEMS, modeling and simulation of them and the computational challenges to develop the computer-aided design (CAD) tools. Previous work on this subject is reviewed and the organization of this study is summarized.

1.1 CAD for MEMS

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) are one of the international recognized mainstream, cutting-edge technology in this new century. MEMS devices (hereafter, we will just call MEMS) are integrated devices or systems made up of a number of small dimensional components, which include micro-electro-mechanical, microfluidic, micro-optical-electro-mechanical and micro-thermal-mechanical devices and systems [1]. MEMS are fabricated using microengineering technologies such as surface micromachining, bulk micromachining, LIGA (German, Lithographie Galvanoformung Abformung), microelectrodischarge machining, laser-etching, 3D printing, wafer bonding, the dissolved-wafer silicon-on-glass process [2], [3]. They usually range in size in the order of micrometers, from a few microns to a few millimeters. These systems can sense, control and actuate on the micro scale, and function individually or in arrays to generate effects on the macro scale.

1 Introduction

A convenient illustration of a MEMS device can be found in Figure 1.1. A lot of proposed microsystems take this form. In this analogy, microsensors first detect changes in the environment. Based on the information from the sensors, the electronic controller then operates microactuators to respond to the environment in the desired way.

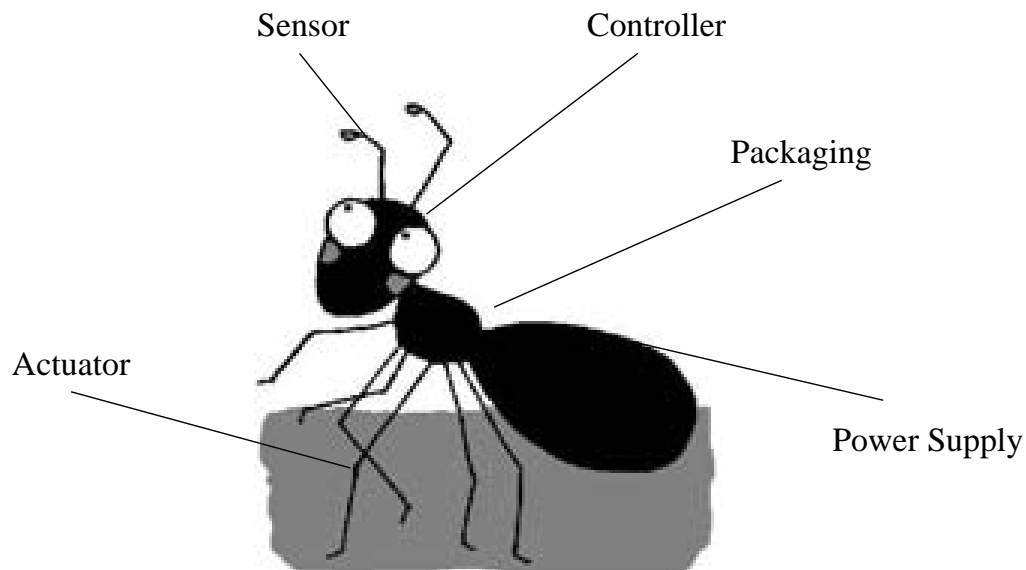


Figure 1.1: Illustrating the main components in a typical MEMS device.

MEMS devices normally involves multiple at least two, and often as many as four or five physical domains, such as mechanical, electrostatic, electromagnetic, thermal, optical, fluidic, or chemical. It is a prerequisite to get to know the details of the effects of these domains for effective and efficient design of MEMS devices. Furthermore, the physical prototyping costs of MEMS are very high due to the number of steps needed in the production of a single device. Therefore modeling, simulation and optimization of them before manufacture are essential and can be far more economical than physical prototyping by accelerating the process of the design, reducing the cost of the production and shortening the time to competitive market. As interest in commercial application of MEMS grows, the need for the sophisticated CAD tools grows dramatically [4].

These CAD tools should allow complete simulation, including the process, device behavioral and system simulation. The ideally need of multi-level CAD for MEMS and the heavily coupling of the multi-physics, combined with consideration associated with their small dimensions and complex shaped geometries, results that the