레버 증폭 구조의 플렉서를 이용한 공초점 현미경의 개발

이상원¹ · 김위한¹ · 정영대² · 박민규³ · 김지현⁴ · 이상인⁵ · 이 호^{1†}

¹경북대학교 기계공학부

☎ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

²한국연구재단

☎ 305-350 대전광역시 유성구 가정로 165

³영남이공대학 기계·자동차학부

☎ 705-703 대구광역시 남구 현충로 170

⁴경북대학교 전자공학과

☎ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

⁵원일파템㈜

☎ 704-832 대구광역시 달서구 월암동 1-52

(2011년 1월 6일 받음, 2011년 2월 14일 수정본 받음, 2011년 2월 15일 게재 확정)

본 연구에서는 레버 증폭 구조를 이용한 플렉서 기반의 나노 스테이지를 설계, 제작하였다. 제작된 나노 스테이지를 샘플 스테이지로 채용한 공초점현미경을 개발하였다. 2차원 이미징의 구현을 위해서, 기존의 공초점현미경은 레이저를 이미징 평면상에 스캐닝하는 방식으로 구현된다. 본 연구에서는 백 나노미터의 구동정밀도를 가지는 나노 스테이지 위에 놓인 샘플을 2차원으로 스캐닝하면서 2차원 이미지를 구현할 수 있는 공초점현미경을 개발하였다. 플렉서 기반의 나노 스테이지는 이중 판스프링, 변위 증폭 레버, PZT 액추에이터 그리고 변위 센서로 구성 되어 있다. 스테이지의 구동 성능 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하였다. 현미경에 사용되는 광원은 적색광 레이저이며, 레이저는 여러 광학요소를 거쳐 샘플스테이지의 샘플에 입사되고, 반사된 빛은 광센서인 PMT(Photo Multiplying Tube)로 계측되게 된다. 계측된 빛의 크기를 이용하여서 2차원 이미징을 구현하였다. 개발된 공초점 현미경으로 생쥐 귀의 피부조직을 관찰하여 현미경의 이미징 성능을 검증하였다. 설계된 샘플 스테이지는 기존의 공초점 현미경의 기계적인 Beam 스캐너를 대신함으로써 현미경의 광경로 및 전체시스템을 간소화 하였다.

The Development of Confocal Microscopy Using the Amplified Double-compound Flexure Guide

Sang-won Lee¹, Wi-han Kim¹, Young-dae Jung², Min-kyu Park³,

Jee-hyun Kim⁴, Sang-in Lee⁵, and Ho Lee^{1†}

¹Laser and Bio Engineering Laboratory, School of Mechanical Engineering,

Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²Division of Nano & Convergence Technology, National Research Foundation of Korea, Daejeon 305-350, Korea

³School of Mechanical & Automotive Engineering Technology,

Yeungnam College of Science & Technology, Daegu 705-703, Korea

⁴School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

⁵Wonilfatem corporation, Daegu 704-832, Korea

(Received January 6, 2011; Revised manuscript February 14, 2011; Accepted February 15, 2011)

[†]E-mail: holee@knu.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

A confocal microscope was developed utilizing a scanning sample stage based on a home-built double-compound flexure guide. A scanning sample stage with nano-scale resolution consisted of a double leaf spring based flexure, a displacement amplifying lever, a Piezo-electric Transducer(PZT) actuator and capacitance sensors. The performance of the two-axis stage was analyzed using a commercial finite element method program prior to the implementation. A single line laser was employed as the light source along with the Photo Multiplier Tube(PMT) that served as the detector. The performance of the developed confocal microscope was evaluated with a mouse ear skin imaging test. The designed scanning stage enabled us to build the confocal microscope without the two optical scanning mirror modules that are essential in the conventional laser scanning confocal microscope. The elimination of the scanning mirror modules makes the optical design of the confocal microscope simpler and more compact than the conventional system.

Keywords: Confocal microscopy, Flexure-guided stage

OCIS codes: (170.1790) Confocal microscopy, (110.0180) Microscopy

I. 서 론

1960년대에 Dr. Minsky에 의해 제안된 공초점현미경(Confocal microscopy)^[1]은 빛의 산란과 형광을 이용한 대표적인 3차원 광영상 시스템으로 생물학, 의학, 재료과학 등에 널리 사용되고 있다. 피하층의 관찰이 제한적인 일반적인 현미경(Wild field microscopy)에 대비해서, 공초점현미경은 관찰 물질(샘플)의 내부를 비절개적(Non-invasive)으로 관찰할 수 있는 영상 시스템이다.^[2] 기본적인 공초점현미경의 작동원리는 그림 1에 소개된다. 단색광을 가지는 레이저가 Beam splitter를 통과한 뒤 대물렌즈를 통해서 이미징 평면(Imaging plane)의 초점에 입사하게 된다. 초점에서 발생한 빛은 입사광의 경로를 되돌아 가게 되며 일부는 Beam splitter에 의해 반사되어 광센서로 입사된다. 광센서 앞에는 수 십 마이크로미터의 직경을 가지는 Pinhole이 위치하게 된다.

광센서 앞에 위치한 Pinhole은 이미징 평면의 초점에서 발생한 빛만 선택적으로 통과하게 하며, 다른 지점 또는 다른 평면에서 발생한 빛은 차단하게 된다. 광센서에 의해 측정된 아날로그 신호는 AD 변환을 거쳐서 빛의 밝기를 나타내는 디지털 수치로 전환이 된다. 레이저 초점은 볼록렌즈에 의해서 광센서 앞에 켄레점(Conjugated point)을 가지게 된다. 이 켄레점에 Pinhole을 위치시킴으로써 레이저의 초점 이외의 지점에서 발생하는 빛은 차단하는 원리에서 “공초점”이라는 이름이 유래 되었다. 공초점현미경으로 2차원 이미지를 구현하기 위해, 레이저 광원을 관찰 샘플에 2차원 (그림 1 (b)에서 X와 Y축)으로 스캐닝하고, 각 지점으로부터 발생한 빛을 광센서로 측정한 뒤 이를 이용하여 2차원의 영상을 만들어 내게 된다. 레이저를 2차원으로 스캐닝하기 위해서 일반적으로 Polygon mirror와 Galvano mirror와 같은 기계적인 스캐닝 거울이 사용된다. 스캐닝 거울을 사용할 때, 이미징 평면의 만곡(Field curvature)을 방지하기 위해 Telecentric design이 필수적이다.^[2,3] 두 축 (X와 Y축)의 Telecentric design을 위해 각 축당 2개의 렌즈로 구성된 Telecentric module이 필요하게 된다.

최근 마이크로/나노 기술이 급속도로 발전되고 있으며, 반도체 제조 및 검사 장비, 초정밀 동작기계 등의 분야에서 고

FIG. 1. The basic concept of the confocal microscopy, a) Major components of the confocal microscopy and b) X and Y axis beam scanning on the imaging plane.

정밀화가 요구되고 있다. 더불어 생산성과 효율성을 높이기 위해 고속 이송 능력에 대한 필요성과 대면적의 이동범위, 고강성 등이 요구되고 있다. 이러한 요구에 맞춰 위치결정기술이 꾸준히 발전되고 있으며, 초정밀 위치결정 기구를 사용하는 다양한 응용이 시도되고 있다. 대표적인 응용 사례로 마이크로/나노급의 측정이 가능한 AFM(Atomic Force Microscopy)과 같은 현미경 분야를 들 수 있다. AFM은 관찰하고자 하는 샘플을 나노미터급의 위치정밀도를 가지는 나노스테이지에 부착한 뒤, 나노스테이지를 XY축으로 스캐닝하면서 표면의 Profile을 탐침(Probe)으로 읽어낸다.^[4] AFM에 사용되고 있는 나노스테이지는 탄성힌지(Elastic hinge)와 판스프링(Leaf spring)을 기본 구성요소로 하는 플렉서(Flexure)를 기반으로 설계되었다. 플렉서를 이용한 나노스테이지의 기본 원리는 그림 2에 소개된다.

압전소자(Piezo-electric transducer: PZT)에 전압이 인가되면 압전소자는 팽창하게 된다. 압전소자의 팽창으로 인해 판스프링으로 고정되어 있던 구동체(Moving mass)가 움직이게 된다. 압전소자의 전압이 해지되면 압전소자는 원래의 상태로 회복하게 되며, 구동체 또한 판스프링의 탄성력에 의해 원래의 위치로 복원하게 된다.

본 연구에서는 AFM 등에 사용되는 플렉서 기반의 나노스테이지를 제작한 뒤, 이를 이용한 공초점현미경을 개발하였다. 2차원 이미징의 구현을 위해서, 기존의 공초점현미경은 이미징 레이저를 이미징 평면상에 스캐닝하였다. 본 연구에서는 백 나노미터의 구동정밀도를 가지는 나노스테이지를 제작하였다. 개발된 스테이지에 놓인 샘플을 2차원으로 스캐닝하면서 2차원 이미징을 구현할 수 있는 공초점 현미경을 개발하였다.

FIG. 2. The basic concept of the flexure based nano-stage system, a) Initial state and b) Moving state.

II. 나노 스테이지 설계 및 제작

본 연구에서 제작한 2축 스테이지는 변위 증폭을 위한 레버(Lever)구조와 판스프링(Leaf spring)의 탄성 복원구조를 기반으로 하고 있다(그림 3). 샘플이 위치하게 될 구동체는 스테이지의 중심부에 위치를 하며, 저속 스캐닝을 위한 Y축 및 고속 스캐닝을 위한 X축은 각각 한 개의 압전소자와 4개의 판스프링과 증폭을 위한 레버와 힌지로 구성되어 있다. 저속의 구동부가 Stage의 외각에 위치하고 있으며 고속의 구동부는 Stage의 안쪽에 배치되어 있다.

X축 및 Y축의 구동부는 완전히 Decoupled되어서 구현되었다. 네 개의 판스프링을 기본요소로 하는 이중 복합(Double compound) 구조를 선택하여 높은 탄성력과 동적 안정성을 확보하였다. 구동체의 변위를 확대하고자 지렛대 원리를 이용한 변위 증폭구조를 도입하였는데(그림 3. (b)), 우선 압전소자의 변위는 레버의 단축에 전달된다. 지렛대의 원리에 의해서 증폭된 변위는 레버의 장축으로부터 구동체에 전달된다.

FIG. 3. Schematic diagram of two-axis nano-stage system, a) The structure of two-axis nano-stage system and b) The lever structure.

레버의 장축부와 구동체는 강철 핀으로 연결되어 있으며, 변위의 증폭비는 힌지와 압전소자 접촉부까지의 거리(a)과 힌지와 강철핀 사이의 거리(b)로 결정된다.

본 연구에서 개발한 스테이지의 설계사양은 표 1과 같이 설정하였다. 일반적인 상용 현미경의 샘플 스테이지 크기가 200 mm × 200 mm에서 300 mm × 300 mm의 크기를 가지고 있다. 본 연구에서는 상용 현미경의 샘플 스테이지 크기를 고려하여 150 mm × 150 mm를 스테이지의 크기로 설정하였다. 최대 변위는 150 μ m로 설정하였으며 구동 반복도는 15 Hz로 설정하였다. 플렉서 스테이지의 요소설계 중 설계자가 주안점을 두어야 할 사항은 판스프링, 힌지 그리고 레버로 나눌 수 있다(그림 4). 판스프링 요소설계 파라미터는 판스프링의 길이(l_s)와 두께(t_s)이며, 이상의 두 가지 요소가 스프링의 탄성계수를 결정하게 된다. 레버의 설계 파라미터는 레

TABLE 1. The specification of nano-stage system

Parameter	Designed	Unit
Total size	150(W)×150(L)×50(H)	mm
Working range	150	μ m
Repetition Rate	15	Hz

FIG. 4. The major parameters of flexure design, a) Leaf spring parameters and b) Lever and hinge parameters.

TABLE 2. The Design parameter of components

Parameter	X Axis	Y Axis	Unit
Leaf spring Length (l_s)	14	16	mm
Leaf spring Thickness (t_s)	0.45	0.5	mm
Lever Length (L)	44	66.5	mm
Lever Width (B)	12.5	12.5	mm
Hinge Neck Radius (R)	1.25	1.25	mm
Hinge Neck Thickness (t_h)	0.5	0.5	mm
Stage Thickness (t)	14.5	14.5	mm

버의 길이(L)와 레버 폭(B)이며, 레버의 길이는 증폭비를 결정하며 폭은 레버의 굽힘량을 결정한다. 힌지의 설계 파라미터는 힌지의 목두께(t_h)와 목 양쪽을 생성하는 원의 반지름(R)이다.^[5,6] 두께가 두꺼울수록 힌지의 변형량과 레버의 변위가 작아진다.^[7]

이상에서 소개된 다양한 파라미터들의 설계 기법을 복합적으로 고려하여서, 본 연구에서는 표 2와 같이 설계요소들의 파라미터를 결정하였다. 스테이지의 제작에 앞서 표 2의 파라미터로 설계된 플렉서 스테이지의 성능을 확인하기 위해서 본 연구에서는 Single pass adaptive 기법^[8]을 적용한 Pro-Engineering 프로그램을 사용하여 FEM 해석을 수행하였다.

X축과 Y축의 변위는 압전소자의 변위 40 μ m를 기준으로 예측하였다. 이 경우 그림 5와 같이 X축과 Y축이 각각 5배의 증폭을 거쳐서 200 μ m 이상의 변위를 발생시킴을 알 수 있다. X축 레버의 최소 공진주파수는 힌지에서 발생하며 135.7 Hz로 예측되었다.

일반적으로 플렉서 스테이지의 구동주기는 공진주파수의 1/3 이하로 조정되기에, 본 연구에서 목표로 한 구동주기 15 Hz는 구현이 가능할 것으로 예측되었다. Y축 레버의 힌지에서 최대의 응력이 발생하며 이는 160 Mpa로 사용하는 알루미늄 소재(AL6061-T6)의 항복응력 이하임을 확인하였다.

이상의 해석을 바탕으로 스테이지를 Milling 및 EDM(Electrical Discharge Machining) 기법으로 제작을 하였다. Milling으로 스테이지의 전체적인 모양과 몸체의 홀 및 보조형상들을 우선 가공한 후, 유연가이드와 내부형상을 Wire-cutting EDM을 이용하여 제작하게 된다. 재료는 플렉서 제작에서 많이 사용되고 있는 알루미늄(AL6061-T6)을 사용하였다.

III. 나노 스테이지의 특성 분석

제작된 스테이지의 구동 특성을 입력 신호에 따른 변위 측정을 통해서 수행하였다. 변위 측정은 Capacitance sensor를 사용하여 이루어 졌으며 Step 구동 신호에 대한 스테이지의 X축과 Y축의 반응을 그림 6에 보여 주고 있다.

그림 6. (a)와 (b)는 50 μ m의 단위의 Step 입력, 그림 6. (c), (d)는 1 μ m 단위의 Step 입력, 그림 6. (e)와 (f)는 100 nm 단위의 Step 입력에 대한 스테이지의 변위를 각각 보여주고 있다. 세 가지의 Step 입력에 대하여 X축과 Y축 모두 입력신

FIG. 5. The analyze of displacement, resonance frequency and stress using the finite difference method, a) Displacements of X and Y-axis, b) The resonance frequency at the X axis lever and c) The stress at a hinge of the X axis lever.

호를 잘 추적하는 변위 구동 성능을 보여주고 있다.

IV. 나노 스테이지를 이용한 공초점현미경 구현

제작된 2축 플렉서 스테이지를 이용한 공초점현미경의 기본적인 구조는 그림 7 (a)에 소개된다.

공초점현미경은 도립형 현미경 형태로 설계되었다. 플렉서 스테이지는 그림과 같이 현미경의 상부를 구성하고 스테이

FIG. 6. Step responses of X and Y axis.

FIG. 7. a) Schematic diagram of the scanning stage type confocal microscopy and b) the implemented confocal microscopy.

지의 중심에 가공된 원형 홀을 통해서 Objective Lens가 샘플에 접근하게 된다. 광원인 레이저에 의해서 발생한 빛은

두 개의 거울을 거친 뒤 50/50 Beam splitter를 통해서 Objective Lens에 도달하게 된다. Objective Lens는 NA 1.3을 가지는 100X 렌즈를 사용하였다. 입사한 광원에 의해서 샘플에서 발생한 빛은 입사광의 경로를 되밟아 가면서 50/50 Beam splitter를 만나게 된다. 이 중에 Beam splitter에서 반사된 빛은 광센서인 PMT(Photo Multiplier Tube)로 전달되게 된다. 50 mm의 초점거리를 가지는 볼록렌즈가 PMT 앞에 위치하면서 PMT로 향하는 빛을 모아주게 된다. 50 μm 의 직경을 가지는 Pinhole을 볼록렌즈의 초점에 위치하게 만들어서 Confocal detection을 가능하게 한다. PMT에서 발생한 전압신호는 A/D 변환카드(NI, USB-6259, USA)가 장착된 PC로 전압신호를 전달하게 된다. A/D 변환카드를 통해서 입력된 신호는 LabVIEW를 이용한 이미지 획득 소프트웨어를 이용하여 영상을 구현하게 된다. 이상의 설계를 바탕으로 구현된 공초점현미경은 그림 7 (b)에 소개 된다.

2축 스테이지를 구동하는 입력신호는 X축과 Y축 신호를 연동하여서 구성하였으며, 고속으로 움직이는 X축 구동은 15 Hz의 Sin 파 입력 신호를 이용하여서 구동하였다. X축이 직선운동을 한번 끝나는 시점에 (X축의 한쪽 끝단에서 다른 한쪽 끝단으로 움직이면) Y축은 0.5 μm 씩 점진적으로 움직이도록 조정하였다. 이상과 같은 알고리즘으로 X축은 Sin파의 한 주기 동안 왕복 이동하게 되며, 두 번의 Line 스캐닝을 구현하게 된다. 이 때 Y축은 각각의 Line 스캐닝 동안 0.5 μm

씩 총 1 μm 를 움직이게 된다. Y축의 구동을 위해서 PZT의 인가전압과 Y축의 구동 변위간의 관계를 Database화 한 뒤, 원하는 변위로의 구동을 위해서 인가전압을 변경하면서 Y축 변위를 조정하였다. 고속으로 구동되는 X축은 Sin파 구동신호를 입력하며 변위를 실시간으로 Capacitance센서로 계측을 한다. 계측된 변위 값을 PC의 AD 카드로 전달하게 되며, LabVIEW를 이용한 이미지 획득 소프트웨어는 X축 변위 값과 PMT 신호값을 이용하여서 영상을 구현하게 된다. Y축과 동일하게 X축의 변위가 0.5 μm 씩 이동할 때마다 PMT의 신호를 읽어 들어서 이미지를 구현하였다.

이러한 스캐너의 X축과 Y축의 구동 변위는 150 μm 로 조정하여서, 영상의 관찰영역(Field of view)는 150 $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ 를 가지게 된다. 0.5 μm 의 공간분해능을 구현하기 위해서 X축과 Y축 모두 0.5 μm 의 간격으로 움직일 때 마다, 샘플에서 반사되는 빛의 밝기를 PMT가 측정하여서 256 gray scale에 맞추어서 이미징화 하였다. 0.5 μm 마다 한 개의 pixel을 구현함으로 전체 이미지는 300 by 300 pixel로 구성되게 된다. Raster 스캐닝을 담당하는 X축을 15 Hz로 구동을 함으로 초당 30번의 Raster 스캐닝이 가능하며, 이는 10초당 하나의 영상을 획득하게 할 수 있다.

개발된 공초점 현미경을 이용하여서 생체조직 샘플을 관찰하였다. 생후 수 개월 된 Balb C형 생쥐의 귀 조직을 추출하여서 스테이지에 장착을 한 뒤 이미징을 수행하였다. 피부의

FIG. 8. Sample image of mouse ear skin, (a) Stratum corneum, (b) Epidermal Layer, (c) Dermal Layer with hair follicle and (d) Dermal Layer with hair follicle.

표면으로부터 다양한 깊이에 존재하는 피부조직을 촬영하였다(그림 8). 표면에 존재하는 다각형 모양의 무핵 각질 세포(Stratum corneum)층을 관찰 할 수 있었으며, 생쥐의 털(화살표)도 명확하게 관찰할 수 있었다. 표면의 바로 밑 부분을 관찰 하였을 때, 각질 세포보다 크기가 작은 표피세포 막(화살표)들이 희미하게 관찰 되었다(b). 표피층 보다 깊이 초점을 맞추었을 때는 털을 생성하는 모낭층(Hair follicle)을 명확하게 관찰 할 수 있었다(c, d).

V. 결론 및 고찰

본 연구에서는 플렉서 기반의 2축 스테이지를 제작하여서 이를 이용한 공초점현미경을 개발하였다. 유한요소법을 이용한 수치해석을 통해서 스테이지를 설계하였으며, EDM 기법으로 스테이지를 제작하였다. 개발된 스테이지의 성능은 변위센서인 Capacitance sensor를 이용하여서 평가하였다. 개발된 2축 스테이지는 100 nm이하의 구동 정밀도를 가지면서, 최대 변위 150 μm 를 발생시킬 수 있도록 설계 제작되었다. 개발된 스테이지를 기반으로 스캐닝 스테이지 형태의 공초점현미경을 개발하였다. 기존의 공초점현미경은 이미징 레이저의 스캐닝을 기반으로 개발 제작되었다. 이미징레이저의 스캐닝을 기반으로 한 공초점현미경(Confocal Laser Scanning Microscopy)은 기계적인 스캐닝 거울을 사용하게 된다. 기계적인 스캐닝 거울을 사용하기 위해서는 스캐너와 Objective lens 사이의 공간 확보 및 이미징 평면의 만곡(Field curvature)을 최소화하기 위해서 Telecentric design을 도입하게 된다. Telecentric design을 위해서 하나의 스캐닝 거울마다 두 개의 렌즈조합을 필요로 하게 된다. 첫 번째 렌즈는 스캐닝거울로부터 초점거리만큼 떨어지게 조정되며, 두 번째 렌즈는 첫 번째 렌즈로부터 두 렌즈의 초점거리 합만큼 떨어지게 된다. 이상과 같은 Telecentric design은 시스템의 크기를 크게 하며 또한 광축의 조정을 복잡하게 만든다. 본 연구에서 이미징 레이저의 스캐닝을 기반으로 한 공초점현미경과 달리 스테이지의 스캐닝을 통해 2차원 이미징이 가능한 현미경을 개발하였다. 스캐닝 거울과 네 개의 Telecentric 렌즈

시스템을 사용하지 않고 현미경을 구현하였다. 이로 인해 공초점 현미경의 소형화와 광축 조정의 용이함을 확보할 수 있게 되었다. 개발된 스캐닝 스테이지 형태의 현미경의 성능향상을 위해서 보다 큰 구동 변위와 빠른 구동 주기를 가지는 스테이지의 필요성이 부각되고 있으며, 이와 관련한 연구가 현재 본 연구팀에 의해서 진행 중에 있다. 변위 측정 시스템 또한 스테이지에 임베디드된 형태의 시스템 설계도 현재 병행하여서 개발 중에 있다. 구동 변위 및 구동 주기의 향상 후, 개발된 스캐닝 스테이지 형태의 공초점 현미경은 생물학 및 의학의 다양한 분야에서 세포단위 관찰에 적용 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

1. M. Minsky, "Microscopy apparatus," U.S. Patent 301467 (1961).
2. T. Wilson, *Confocal Microscopy* (Academic Press, San Diego, CA, USA, 1990).
3. C. Ockleford, "The confocal laser scanning microscope (CLSM)," *The Journal of Pathology* **176**, 1-2 (1995).
4. T. Ando, N. Kodera, E. Takai, D. Maruyama, K. Saito, and A. Toda, "A high-speed atomic force microscope for studying biological macromolecules," *P. Natl. Acad. Sci. USA* **98**, 12468-12472 (2001).
5. W. Xu and T. King, "Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations," *Precis. Eng.* **19**, 4-10 (1996).
6. H. S. Oh, S. J. Lee, Y. W. Kim, and D. W. Lee, "Behavioral characteristics of nano-stages according to hinge structure," *J. Nanosci. Nanotechnol.* **7**, 4146-4149 (2007).
7. A. Suleman, S. Burns, and D. Waechter, "Design and modeling of an electrostrictive inchworm actuator," *Mechatronics* **14**, 567-586 (2004).
8. R. Toogood, *Pro/MECHANICA Tutorial Structure* (SDC Publications, Alberta, Canada, 2000).