

## 미세 조작을 위한 압전 구동 집계의 설계 및 제작

박종규(포항공대 대학원 기계공학과), 문원규(포항공대 기계공학과)

### A Design and Manufacturing of Two Types of Micro-grippers using Piezoelectric Actuators for the Micromanipulation

J. Park(Mecha. Eng. Dept. Postech), W. Moon(Mechanical Eng. Dept., Postech)

#### ABSTRACT

In this study, two new types of micro-grippers in which micro-fingers are actuated by piezoelectric multi-layer benders and stacks are introduced for the manipulation of micrometer-sized objects. First, we constructed a 3-chopstick-mechanism tungsten gripper, which is composed of three chopsticks: two are designed to grip micro-objects, and the third is used to help grasp and release the objects through overcoming especially electrostatic force among some surface effects including electrostatic, van der Waals forces and surface tension. Second, a 2-chopstick-mechanism silicon micro-gripper that uses an integrated force sensor to control the gripping force was developed. The micro-gripper is composed of a piezoelectric multilayer bender for actuating the gripper fingers, silicon fingertips fabricated by use of silicon-based micromachining, and supplementary supports. The micro-gripper is referred to as a hybrid-type micro-gripper because it is composed of two main components: micro-fingertips fabricated using micromachining technology to integrate a very sensitive force sensor for measuring the gripping force, and piezoelectric gripper finger actuators that are capable of large gripping forces and moving strokes. The gripping force signal was found to have a sensitivity of 667 N/V. To the design of each of components of both of the grippers, a systematic design approach was applied, which made it possible to establish the functional requirements and design parameters of the micro-grippers. The micro-grippers were installed on a manual manipulator to assess its performance in tasks such as moving micro-objects from one position to a desired position. The experiment showed that the micro-grippers function effectively.

**Key Words** : Piezoelectric actuator (압전 구동기), Micro-gripper (미세 집계), three chopstick (세 젓가락), force sensor(힘 센서), Micro manipulation(미세 조작)

#### 1. 서론

마이크로 그립퍼는 로봇핸드나 그립퍼를 응용하여 인간의 눈에 거의 보이지 않을 정도로 작은 물체를 다루기 위해 등장한 새로운 기술 요소이다. 마이크로 그립퍼는 미세 물체를 조작하기 위한 가장 핵심적인 요소로서 미세물체를 잡고 놓는 과정을 직접적으로 수행하는 역할을 하게 되며 일반적으로 실제 미세 물체를 그립핑하는 미세 핑거 팁(Micro-finger tip)부, 각각의 핑거 팁을 원하는 위치까지 움직이게 하는 구동부(Actuator), 구동할 때 그립핑 힘을 측정하기 위한 센싱부(Sensor), 그리고 마이크로 매니퓰레이터와 연결해주는 지지대부(Base) 등으로 구성되어 있다.

마이크로 그립퍼는 미세 조립(Micro Assembly) 분야, 생명공학 분야(Bio Technology), 나노 기술 분야(Nano Technology) 등 다양한 연구 분야에 이용될 수 있다[1,2]. 즉 미세 가공(Micro machining) 기술로 제작된 초소형 부품이 하나의 시스템으로 구성되어 그 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 미세 조립(Micro assembly) 과정이 이루어져야 한다. 이 작업의 핵심은 미세물체를 잡아서 정확한 위치에 놓는 것이다.

지금까지 이루어진 그립퍼를 잡는 방식에 따라 살펴보면 물체와의 직접적인 접촉을 통해 조작하는 기계식 그립핑 방식[3,4]과 압력이나 인력의 적절히 이용하는 설계를 통한 비접촉식 그립핑 방식이 있다[5,6]. 이 중에서 비접촉식 그립핑 방식은 물체를

다양한 방향으로 조작할 수 없고 적절한 제어의 어려움으로 인해 최근에는 대부분 접촉식인 기계식 그립핑 방식이 채택되고 있다. 기계식 그립퍼의 대표적인 구동방식으로는 정전형[1], 압전스택형[4], SMA형[7] 등을 들 수 있다.

지금까지 연구된 마이크로 그립퍼는 가장 기본적인 요구 사항인 잡고 놓는 기능 조차도 완벽하게 수행하지 못하는 것들이 대부분이었다. 이는 마이크로 그립퍼에 대한 연구가 아직 초기 단계라는 것을 반증하면서 미세 세계에 대한 이해를 기반으로 하여 마이크로 그립퍼를 고안하고 설계 제작해야 할 필요성을 암시하는 사실이다. 그러므로 본 연구에서는 마이크로 그립퍼의 고안 과정에서부터 설계, 제작 과정까지 현재 알려져 있는 미세 세계의 특이 현상과 예상되는 문제점등을 고려하여 기능을 제대로 수행할 수 있는 그립퍼를 개발하고자 하였다. 특히 최근에 관심이 더욱 높아진 미세 바이오 물체 조작을 위한 엔드 이펙터(End-effector)로서의 마이크로 그립퍼를 개발 목표로 설정하였다.

## 2. 설계 과정

요구되는 기능을 제대로 수행할 수 있는 마이크로 그립퍼를 개발하기 위해서는 체계적인 설계 과정이 필요하다. 왜냐하면 미세 물체의 거동이 기존에 다루었던 매크로 크기의 물체의 거동과 상당히 달라 상식적인 방식으로는 목표를 달성하기 힘들기 때문이다. 대표적인 예가 물체가 그립퍼에 접촉되는 현상인데 이는 매크로 크기의 물체를 그립퍼를 설계할 때에는 고려조차 할 필요 없을 정도로 하찮은 사항이나 마이크로 그립퍼의 설계에서는 가장 해결하기 어려운 문제 중 하나로 떠오르고 있으며 그 원인도 정확하게 밝혀져 있지 않다.

### 2.1 핑거 구동기의 선정

현재까지 사용된 구동기로는 압전 스택 구동기(Piezoelectric Stack Actuator), 압전 유니모프 구동기(Piezoelectric Unimorph Actuator), 정전형 콤드라이버 구동기(Electrostatic Comb-driver Actuator), 형상기억합금 구동기(Shape Memory Alloy, SMA), 유체 압력 구동기 등이 있으며 이 중 트랜스포머를 부착한 압전 스택 구동기가 가장 널리 이용되었다. 본 그립퍼에서는 큰 힘과 작업공간을 위해 압전 멀티레이어 벤더 구동기와 압전 스택 구동기를 채택하였다. 압전 멀티레이어 벤더는 압전물질에 전압을 인가했을 때 길이방향의 변형이 일어나는 데 이러한 길이 방향 변형이 굽힘 변형을 야기하도록 압전체를 구성한 구동기를 말한다. 이 구동기의 특징은 길이 방향 변형을 굽힘 변형으로 변환함으로써 커다란

변위를 얻을 수 있다는 점과 압전판을 여러 개 겹친 구조이므로 유니모프나 바이모프보다 훨씬 큰 힘을 낼 수 있다는 점이다. 본 그립퍼에서 1개의 핑거 팁이 이러한 멀티레이어 벤더에 의해 각각 100  $\mu\text{m}$  변위로 구동된다. 또한 압전 스택은 33방향의 변형을 이용하는 구동기로써 -10 ~ +60V 입력 전압 범위에서 -1 ~ +5  $\mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸다[8]. 본 그립퍼에서 압전 핑거 팁 하나를 구동하여 제작 상에서 발생할 수 있는 핑거 팁 끝 만의 높이차를 최소화 하도록 설계되었다. 본 그립퍼에 쓰인 이러한 압전 스택과 멀티레이어 벤더는 기존의 그립퍼에 비해 월등히 뛰어난 변위와 힘을 가지고 있으며 특별한 트랜스포머가 필요 없어서 설계를 간단화시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다.

### 2.2 핑거와 핑거 팁

지금까지 다양한 종류의 핑거 팁이 이용되었다. 많은 경우 핑거와 핑거 팁은 하나의 구조물로 제작되었는데 그 예로 실리콘을 이용한 미세 그립퍼 핑거나 형상기억합금을 응용한 핑거 그리고 흡착식 원형 핑거 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 힘센서가 내장된 실리콘 팁과 원자현미경에서 이용되는 텅스텐 와이어 팁을 이용함으로써 그립핑 과정을 복합적으로 분석할 수 있었다.

#### 2.2.1 힘센서가 내장된 실리콘 팁

미세 공정에 의하여 제작된 실리콘 핑거는 핑거 팁을 마이크로 미터 크기로 설계 제작될 수 있고, 핑거의 강성이 미세 물체에 비하여 지나치게 크지 않아 오작동에 의하여 물체를 파손할 위험이 작으며, 핑거의 구조에 미세한 힘도 측정 가능한 힘센서를 장착할 수 있다는 장점이 있다. 단점으로는 핑거의 전체 크기에 한계가 있고 비교적 작은 변위로 작동하는 핑거 구동기만이 사용가능하며 재료 특성상 파손의 위험이 많다는 점 등을 들 수 있다[9]. 그러나 그립퍼의 파손 위험은 특별한 패키징이나 보호구를 이용하고 위치와 힘이 정밀하게 제어한다면 극복될 수 있는 단점이다.

본 연구에서는 미세 바이오 물체 조작이 가능한 마이크로 그립퍼 설계 제작이 목표이므로 마이크로 머시닝으로 제작되는 실리콘 그립퍼와 압전 스택 등으로 구동되는 일반 제조기술로 만드는 그립퍼의 잡종(Hybrid)형 핑거를 개발하였다. 즉 핑거의 구동부에는 압전 멀티레이어 벤더를 사용하여 핑거 팁에 큰 변위를 줄 수 있게 하고 핑거 팁은 마이크로 머시닝으로 제작된 미세 외팔보를 사용하는 핑거 시스템이다. 이 때 실리콘 핑거 팁에는 원자현미경(AFM : Atomic Force Microscope)에 사용되는 것과 같은 종류의 미세 외팔보와 압저항을 이용한 힘센서

가 내장되어 있다. 미세 외팔보는 힘 측정 센서의 일부이면서 핑거 팁으로 사용할 수 있어서 마이크로 그립퍼에는 완벽하게 적합한 방식이다. 외팔보를 작고 연약하게 만들면 만들수록 센서로서의 민감도는 높아지나 외팔보는 핑거 팁의 기능도 해야 하므로 요구되는 민감도를 얻을 수 있는 범위 내에서 최대한 스티프하고 외팔보의 길이를 길게 설계하였다.

### 2.2.2 원자현미경용 텅스텐 팁

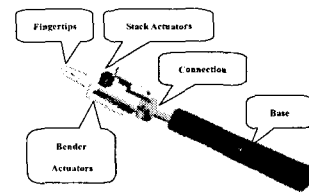
본 연구에서는 또다른 핑거와 핑거팁으로써 압전 멀티레이어 벤더 구동부에 원자 현미경에서 탐침용으로 쓰이는 텅스텐 와이어 핑거 팁을 사용하는 복합적 핑거(Hybrid finger) 구조를 채택하였다. 텅스텐 탐침은 핑거 끝점을 서브 마이크로 이하로 최대한 작게 만들 수 있을 뿐만 아니라 길이 조정이 원활하고 몸체의 강성이 커서 취급 부주의로 인한 파손의 위험이 적다. 텅스텐 팁으로 제작된 그립퍼에서는 3 개의 핑거 팁을 이용하도록 설계되었으며 중 두 개의 핑거 팁은 물체를 잡을 수 있도록 하였고 나머지 하나의 핑거 팁은 물체가 뺏겨나가지 않게 하는 역할을 맡게하여 안정적으로 잡고 이송시킬 수 있도록 설계되었다. 그리고 핑거 팁간의 끝점을 맞출 수 있도록 하나의 핑거 팁은 물체를 잡는 방향으로 구동시키지 않고 지지하는 역할을 하도록 설계하였다. 그러나 이 지지하는 역할을 하는 핑거 팁도 끝점을 맞추는 방향으로 구동시킬 수 있도록 설계하였는데 그 이유는 그립퍼 제작 과정에서 발생하는 오차를 보정할 필요가 있기 때문이다.

### 2.3 방진 설계 과정

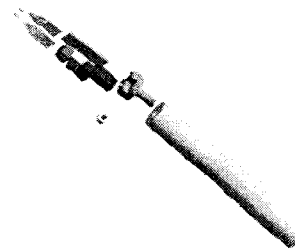
그립퍼를 미세 물체가 놓여 있는 정확한 위치로 이동해서 물체를 잡을 때 구조 진동에 의하여 핑거 팁 끝이 떨린다면 작업을 수행할 수 없다. 이러한 구조 진동에 의한 문제를 봉쇄하기 위해서는 진동의 원천과 전달되는 진동의 성질을 알아야 한다. 일반적으로 미세 물체 조작 시스템은 빠른 속도로 운전되지 않으므로 그립퍼가 100 Hz 미만의 주파수 성분의 가진력만을 기반 운동으로부터 받는다고 가정하였다. 전달되는 진동의 진폭이 그립퍼 몸체의 구조적 성질에 의하여 증폭되는 일이 없도록 하기 위해선 충분한 강성을 확보하여 100 Hz 이상의 높은 고유진동수를 갖도록 그립퍼 조립구조를 설계하여야 한다[10]. 그러므로 개발된 그립퍼는 유연한 연결부위가 없도록 하기 위해 각 부품들을 가능한한 볼트 체결로 조립 설계하였다.

### 2.4 설계 마이크로 그립퍼의 구성

이러한 여러가지 요구조건 및 문제점을 고려해서 설계된 그립퍼의 구조는 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 그립퍼지지대, 지지대와 구동기 연결부, 1 개의 압전 멀티레이어 벤더 구동기(Piezoelectric Multilayer Bender Actuator)와 1 개의 압전 스택 구동기(Piezoelectric Stack Actuator)로 이루어져 있다. 팁으로는 실리콘 핑거 팁과 텅스텐 핑거 팁을 장착할 수 있다. 각각의 부품의 정밀 모델링(Modeling), 설계(Design) 및 조립(Assembly)은 상용 CAD 프로그램에 의해 수행되었으며 대상물체의 크기를 100  $\mu\text{m}$  이하로 정하였기 때문에 핑거 팁 끝부분의 간극을 약 100  $\mu\text{m}$  정도가 되도록 설계하였다.



(a) The tungsten microgripper



(b) The silicon microgripper

Fig. 1 Composition of the microgrippers

## 3. 제작 과정

본 그립퍼의 제작과정의 가장 큰 특징은 구동부, 지지부 및 연결부는 NC 가공, 방전가공(Electrical Discharge Machining, EDM), 연삭가공(Grinding)에 의해 이루어졌고 핑거 팁은 마이크로 머시닝 기술을 이용해서 이루어졌다는 점이다.

실리콘 핑거 팁은 벌크 마이크로 머시닝 기술에 의하여 만들어졌으며 두께가 300  $\mu\text{m}$ 이고 저항치 1~10  $\Omega\text{cm}$ 의 n-type 양면 폴리싱된 웨이퍼를 이용하였다. 반면 텅스텐 핑거 팁은 원자현미경(Scanning Tunneling Microscope)에 사용되는 텅스텐 탐침을 제작하는 방식과 같이 에칭(Etching) 방법을 이용하여 제작하였다.

그립퍼 부품 중 구동기와 지지대 연결부는 그 구조가 복잡하고 크기가 매우 작으며 약 3도의 각도를 주어야 하는 어려움 때문에 일반 기계 가공으로는 제작이 불가능하였다. 따라서 최근 초소형 기계 부품 제작으로 많이 이용되고 있는 방전가공(Electrical Discharge Machining)을 통해 이루어졌다. 이외에도 지지대 부분은 NC 가공을 이용하여 제작되었으며 각 부품은 연삭가공(Grinding)을 통해 마무리 되었다. 구동기는 외주 주문 제작을 통해서 구매하였다[8].

이와 같이 각 부품의 치수오차를 최소화하기 위해 정밀 가공하였음에도 불구하고 핑거 팁의 길이를 정확히 조정하는 문제와 핑거 팁과 구동기의 본딩(Bonding) 문제로 인해 설계한 도면과는 수 mm의 오차가 있었다. 즉 3개의 핑거 팁 끝점의 간극이 각각 100 μm 정도가 되게 하면서 핑거 팁 끝점의 길이가 거의 일치하도록 맞추는데 어려움이 있었다. 이러한 정밀 조립 과정의 어려움을 극복하기 위해 핑거 팁 끝을 정확히 맞추기 위한 마이크로 XYZ 축 스테이지(Stage), 마이크로 회전 스테이지 그리고 일반 그립퍼를 이용했으며 12 배율 CCD 카메라를 이용해서 핑거 팁 간극과 끝점을 확인하면서 조립하였다. 핑거 팁과 구동기의 결합을 위해서 시아노 아크릴 계통의 순간접착제를 이용하였으며 조립과정은 Fig. 2에 잘 나타나있다

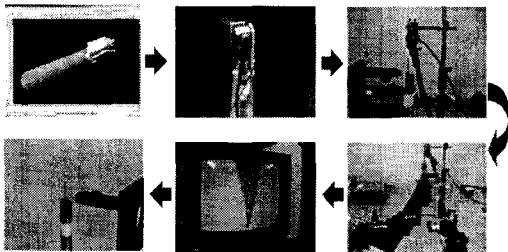


Fig 2. Assembly procedure of the gripper

#### 4. 성능 시험

본 실험의 목표는 다음과 같이 정리될 수 있다.

1. 각 미세 핑거들이 작동 여부를 시험한다.
2. 몇몇 미세물체를 잡고 목표지점까지 이동해서 놓는 과정을 실행하여 그립퍼 성능을 시험한다.
3. 실험 과정에서 발생할 수 있는 여러가지 미세물체의 거동을 관찰하고 분석한다.

이러한 3 가지 실험 목표의 목적은 향후 미세 조립을 위한 마이크로 그립퍼의 설계 개선 방향 제시이다.

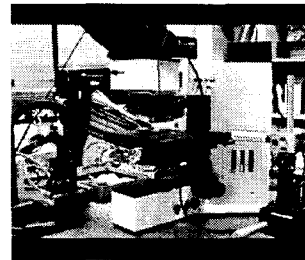
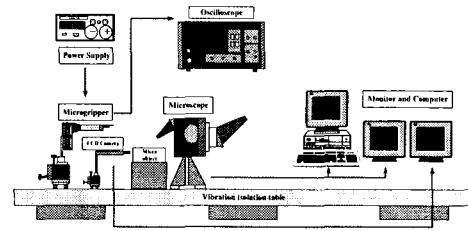


Fig. 3 Experimental setup for the gripping test

#### 4.1 실험 셋업

마이크로 스테이지를 이용한 전체 실험 세팅은 Fig. 3에 보여주고 있다. 실험 세팅은 크게 그립핑 시스템(Gripping system), 비전 시스템(Vision System), 미세물체(Microparts)로 분류할 수 있다. 그립핑 시스템은 2개의 XYZ 축 마이크로 스테이지(Micro stage), 회전 스테이지(Rotational stage), 기울임 스테이지(Tiling stage), 3개의 직각 브라킷(Bracket), 파워 서플라이(Power supply) 그리고 마이크로 그립퍼(Microgripper)로 이루어져 있다. 비전 시스템(Vision system)은 다양한 각도에서 입체적으로 미세 물체를 관찰할 수 있도록 구성되어야 한다. 왜냐하면 핑거 팁을 다양한 각도와 방향에서 관측해야만 조정자(Operator)가 입체적으로 분석하고 작업하기가 쉬우며 그립퍼 파손의 위험 가능성도 줄어든다. 그래서 두 개의 핑거 팁 끝이 바닥과 수평이 될 수 있도록 마이크로 회전 스테이지(Rotational stage)를 이용해서 세팅하였다. 본 실험에 이용된 비전 시스템은 12 배율 CCD 카메라, 10 배율 CCD 카메라, 캠코더(Camcorder) 1대, CCD monitor 그리고 현미경으로 이루어져 있다. 이 중 현미경은 위쪽에서 관측하게 되고 CCD 카메라는 측면을 보여준다. 그리고 고성능 캠코더는 전체 실험 과정을 촬영하는 데 이용되었다. 시편은 그립퍼 성능 시험의 차원으로 약 50~100 μm 정도의 크기를 가지는 쇠구슬(Steel bead)을 대상으로 실험하였다.

#### 4.2 결과 및 토의

팅스텐 핑거팁은 도체로 이루어져 있기 때문에 그라운딩을 통해 미세 물체와 팁에 존재하는 정전력을 최소화함으로써 미세물체를 잡고 놓는 작업을

원할히 수행할 수 있었다. 또한 3 개의 핑거팁을 이용하였기 때문에 물체를 매우 안정적으로 잡을 수 있음을 확인하였다. 그리고 실리콘 핑거팁은 유순한(Compliant) 성질을 가지고 있어서 예상보다 큰 변형속에서도 파손되지 않고 안정적으로 물체를 잡고 놓을 수 있었다. 또한 핑거팁에 내장되어 있는 힘센서의 신호도 확인할 수 있었다. 두 개의 핑거팁 모두 제작상의 오차를 최소화 할 수만 있다면 효과적으로 미세물체를 잡고 놓는 데 이용될 수 있음을 확인하였다. Fig. 4 는 텅스텐 그립퍼를 이용하여 최구슬과 복잡한 형상의 조각을 잡고 놓는 실험을 보여주고 있으며 Fig. 5 은 이러한 실리콘 그립퍼를 이용해서 풀어져있는 약 100  $\mu\text{m}$  크기의 최구슬 3 개를 일직선으로 정렬하는 실험을 나타내었다.

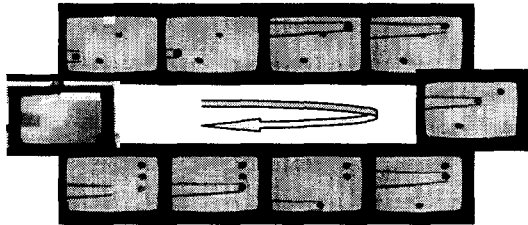


Fig. 4 Gripping experiment using the silicon gripper



Fig. 5 Gripping experiment using the tungsten gripper

## 5. 결론

본 연구에서의 내용 및 성과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 기계식 마이크로 그립퍼 설계할 때 필요한 기능적 요구 조건 즉 잡는 기능, 놓는 기능, 방향조정 기능, 그리고 방진 기능에 대한 물리적 설계인자를 정리하였다.
2. 앞선 설계 인자를 고려해서 큰 작업공간과 힘을 가진 압전 멀티레이어 밴더와 압전 스택을 이용하였으며 실리콘 핑거팁과 텅스텐 핑거팁을 이용하여 두가지 종류의 마이크로 그립퍼를 제작하였다.
3. 이러한 그립퍼를 이용해서 미세 물체를 조작하는 실험을 실시함으로써 기존의 그립퍼보다 향상된 성능을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 과기부의 정책연구개발사업에 의한 “마이크로 텔레 매니퓰레이터 제작을 위한 핵심 요소 및 시스템 기술 개발” 과제(관리 번호:전기전자 99-15)를 통해 수행되었다.

## 참고문헌

1. F. Arai, D. Andou and T. Fukuda, Adhesion forces reduction for micro manipulation based on micro physics, Proceedings, IEEE The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp 354-359, 1996.
2. P. Kim, and, C. M. Lieber, Nanotube Nanotweezers, Science, 286, pp 2148-2150, December 1999
3. Y. Zhou and B. J. Nelson, The effect of material properties and gripping force on micrograsping, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '00), 2, pp 1115-1120, 2000.
4. Y. Haddab, N. Chaillet, and A. Bourjault, A microgripper using smart piezoelectric actuators, Proceedings, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), 1, pp 659-664, 2000.
5. T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome, and T. Fukuda, Acoustic manipulation of microobjects using an ultrasonic standing wave, Proceedings, Micro Machine and Human Science, pp 83, 1994
6. H. Aoyama, S. Hiraiwa, F. Iwata, J. Fukaya, and A. Sasaki, Miniature robot with micro capillary capturing probe, Proceedings, the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS '95), pp 173-178, 1995.
7. A. P. Lee, D. R. Ciarlo, P. A. Krulevitch, S. Lehw, J. Trevino, and M. A. Northrup, Practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation, Proceedings, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 2, pp 368-371, 1995.
8. <http://www.ferroperm-piezo.com/>
9. C. J. Kim, A. P. Pisano, and R. S. Muller, Overhung electrostatic microgripper, Proceedings, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp 610-613, 1991.
10. Pilkey, W.D., "Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices" Wiley-Interscience, 1994, pp 466-468