

최근의 마이크로머시닝 기술의 연구상황과 전망

藤田 博之

Present and Future Research Trend of Modern Micromachining Technology

Fujita Hiroyuki



- 藤田 博之(동경대학 생산기술연구소)
- 1952년생.
- Micromechatronics를 전공하였으며, IC-compatible Micromachining, Microactuators 등에 관심이 있다.

1. 머리말

그런, 반도체 제조기술이나 주사 터널 현미경 등의 진보에 따라, 마이크로 미터 오더의 입체구조를 실현하거나, 원자 한개를 조작하여 미세한 패턴을 그리게 할 수 있게 되었다. 즉, 육안으로는 보이지 않을 정도의 복잡한 기계를 만드는 것이 기술적으로 가능한 단계로 접어들어가고 있으며, 소위 마이크로머신의 연구가 시작되려 하고 있다.^(1,2) 그림 1에 나타낸 것과 같이 마이크로머신의 연구는 제작법(마이크로머시닝), 요소 장치(센서, 액츄에이터, 미니어처 기계)로부터 응용 예에 이르기까지 여러가지 기초 분야로 이루어져 있다.

마이크로머신의 제작법인 마이크로머시닝 법에 대해서도 여러가지 각도에서 연구되고 있다. 먼저, 종래에 기계 가공에 관한 지식을 최대한으로 살리면서 크기를 mm 크기에 서 서서히 작게 해가는, 미니어처 기계의 접근방법이 있고, 관내 주행기계^(3,4)나 핀셋의 제어^(5,6) 등의 성과가 얻어지고 있다. 원자로 배관 등의 보수·점검이나 체내를 보는 내시

경에의 응용 등, 구체적인 응용도 생각하기 쉽고, 또 종래 기술의 단계적 발전으로 많은 사람에게 받아들여지기 쉬운 방법이다.

이것에 대해, 미니어처 기계의 치수보다 한 오더 이상 작은 수십 μm 의 기계를 만들려고 반도체 기술에 입각한 마이크로머시닝을 연구하는 접근 방법도 있다. 수백만 개의 트랜지스터를 결합한 DRAM을 한 개당 1000엔 이하로 공급할 수 있는 기술을, 마이크로머신의 제작에도 이용하고자 하는 시도이다. 반도체 마이크로머시닝은 1970년대부터 연구가 시작되어,⁽⁷⁾ 1987년에 표면 마이크로머시닝 법의 개발^(8,9)이나 그것을 이용한 정전 마이크로 모터^(10,11)의 성공으로 오늘날의 마이크로머신의 연구 붐을 불러일으켰다.

이 붐의 배경은, 단순히 눈으로 볼 수 없을 정도의 작은 것을 만들 수 있다는 것뿐만 아니라, 다음과 같은 가능성에 대하여 많은 사람이 매력을 느꼈기 때문일 것이다. 그 가능성이라는 것은, ① 조립할 필요가 없는 프리-어셈블리 가공, ② 복잡한 시스템의 일괄 제작, ③ 센서나 마이크로프로세서를 포함한 집적화와 지능화, ④ 다수의 서브시스템을 사용한 자율 분산형의 운동시스템의 실현,

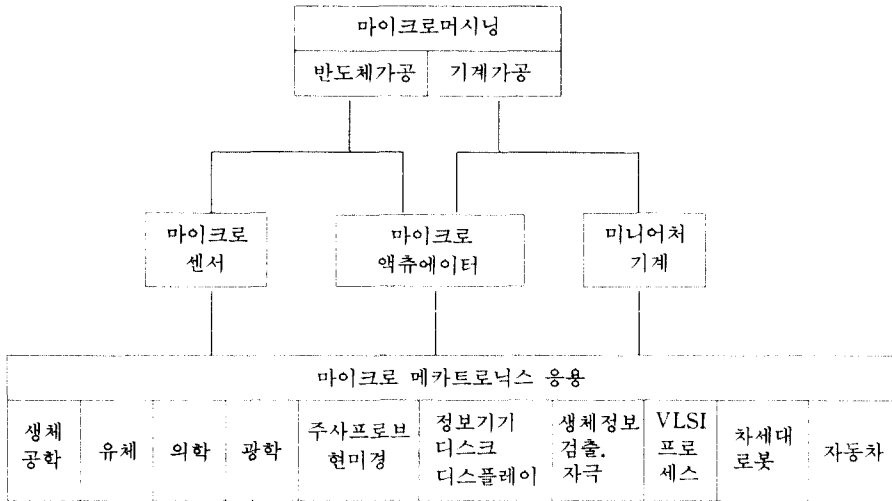


그림 1 마이크로머시닝과 마이크로 메카트로닉스 제요소의 관계

등이다. 일본, 미국, 유럽의 많은 대학에서 여러가지 종류의 모터, 액추에이터, 마이크로 구조의 시험제작이 행해지고 활발한 연구 분야로서 확립되어 왔다.^(1,2)

그러나 이 분야에 관한 보도 등을 보면, 몇 가지의 오해받기 쉬운 인상이 저절로 선행되는 경향이 있다. 하나는, 마이크로머신이라는 말을 문자 그대로 받아들여서 SF영화 「마이크로의 결사권(원제 : A Fantastic Voyage)」의 잠수정과 같이, 종래의 마크로한 기계를 그대로 마이크로한 기계로 축소한 것을 생각해 내는 경향이다. 그러나 물리법칙이나 기술적 제약을 잘 생각해보면, 이렇게 단순한 방법으로는 능률적으로 움직이는 마이크로의 기계를 만들 수 없는 것을 알 수 있다. 이 때문에, 마이크로 세계의 논리에 맞는 마이크로머신을 설계하여, 제작하는 것이 필요하게 된다. 또 하나는 “마이크로머신의 크기는 곤충이나 미생물과 비슷하다,” 그 때문에(?), “마이크로머신은 이러한 생물의 기능(유연성, 자기증식성 등)을 지닐 수 있다.”라는 비약된 발상이다. 기술의 뒷받침 없이 이렇게 주장하는 것은 혼란을 초래하는

원인이 될 뿐이다. 작은 생물은 마이크로머신의 존재증명이고, 많은 발상의 원천이 되는 것은 사실이나, 그것과 공학적인 실현가능성을 혼동해서는 안 된다.

2. 상식이 통하지 않는 마이크로의 세계

그럼 여기서, 마이크로머신이 과연 마크로한 기계의 단순한 소형판인지 아닌지에 대하여 보다 상세히 생각해 보자. 이 때까지도 작은 기계를 만들려고 하는 시도가 있었고, 몇 가지의 시작 예도 있었다. 그러나 이것이 결코 보편화되지 않았던 이유는 다음과 같은 난점이 있었기 때문이다.

- ① 스케일링의 벽
- ② 정보교환의 벽
- ③ 단품 조립 생산의 벽

이들 세 가지의 벽에 대하여 좀더 상세히 설명하기로 한다.

2.1 스케일링의 벽

스케일링의 법칙이란 물체의 크기를 변화시켰을 때 여러가지 물리량이 치수의 몇 승

에 비례하여 변화하느냐를 나타내는 법칙이다. 마이크로 세계에서는 치수의 3승에 비례하는 체적의 효과(예: 무게, 관성)가 상대적으로 약해지고 치수의 2승에 비례하는 면적의 효과(예: 방열, 표면마찰)가 탁월하다. 이 때문에 “공중에 물체를 놓으면 낙하한다.”라는 마크로 세계의 상식은 눈으로 안보일 정도의 작은 먼지에 대해서는 성립하지 않는다. 먼지는 매우 가볍고 표면에 작용하는 공기의 마찰에 의해서 언제까지나 공중에 부유한다. 이것 때문에 마크로의 세계에서 잘 움직이는 기계도 그대로 작게 해서 잘 움직이지 않거나 매우 효율이 나빠져서 실용화할 수 없다.

그림 2에 미소화된 잠수정이 스크류를 사용해서 앞으로 가려고 해도 좀처럼 앞으로 갈 수 없는 것에 대하여, 편모를 돌려 진행하는 박테리아가 아주 쉽게 헤엄치는 모습을 나타내었다. 마이크로 세계가 되면은 물의 점성이 관성에 비해서 지배적으로 되기 때문에 스크류로 물을 밀어내어 반동으로 진행하는 방법은 잘 되지 않고, 포도주 코르크 마개따개의 나선을 밀어내는 것처럼 편모를 물에 밀어내면서 앞으로 가는 미생물은 마이크로 세계의 법칙에 맞는 추진 방법을 이용하고 있다.

또한 그림 3에는 미소화한 코끼리와 거대화된 개미의 그림을 나타낸다. 몸의 크기와 다리의 굵기가 균형이 맞지 않는 것을 알 수 있다. 체중은 치수의 3승으로 커지는 것에 대해서 다리의 강도는 치수의 2승에 비례되는 단면적에 비례하기 때문에 원래 몸이 큰 코끼리는 다리가 굵고 개미는 가는 것이다. 이 때문에 거대화한 개미는 걸어가려고 할 때 다리가 부러져버릴 것이다. 이와 같이 치수의 몇 승에 비례하여 힘이나 그 외의 물리량의 변화를 나타내는 것이 소위 스케일링의 법칙이고 기계의 마이크로화에 있어서 반드시 고려해야 된다. 예를 들어서 저자들의 세라믹계 고온저전도체의 마이스나 효과에



그림 2 마이크로 잠수정과 박테리아

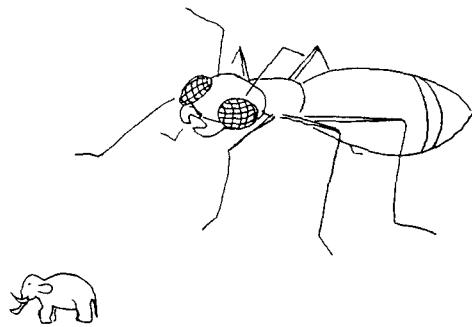


그림 3 미소화 코끼리와 거대화 개미

의한 반발력에 의해서 영구자석의 가동부를 부상시켜서 마찰을 피하는 저전도 리니어 모터⁽¹²⁾나 히구치 등의 압전소자의 급속변형에 따른 마찰력을 이용하여 미소이동을 일으키는 기계는 스케일링을 잘 이용한 미소화에 적합한 수법이라고 할 수 있다.

2.2 정보교환의 벽

다음으로 정보교환의 벽이라는 것은 기계를 제어하는 정보의 검출과 처리를 위하여 센서와 컴퓨터를 접속할 필요가 있으나 그 배선이 기계 그 자체와 같을 정도로 커져버리는 문제이다. 특히 다수의 소형기계를 좁은 장소에 집중하여 사용하려고 할 때(예를 들어서 바늘의 끝과 같은 매우 좁은 표면에 많은 기계요소를 장착할 때)에는 이것은 큰 문제가 된다. 이 문제는, 제어하고 싶은 마이크로한 대상의 정보를 모두 중앙의 컴퓨터

로 보내려고 하기 때문에 생긴다. 정보처리 계를 계층화하여 국소적인 마이너 피드백 루프를 마이크로한 세계중에 실현할 수 있으면 통신선과 통신량을 대폭 줄일 수가 있다. 이 국소적인 정보처리의 능력을 올려가면 작은 시스템에 의해서 소위 자율분산시스템을 구현할 수 있을 것이다. 또, 마이크로 센서를 마이크로 스트럭처에 집어넣고 구조를 간단화하는 것과 동시에 검출정밀도를 좋게 할 수 있다.

2.3 단품조립생산의 벽

더해서 기계부가 소형으로 되면 그것을 취급하고 조립하는 것은 어려워진다. 한 개의 소형기계를 만드는 단품생산에서는 완성품의 코스트는 매우 높아지고 코스트를 문제로 하지 않는 특수한 용도 이외에는 이용할 수 없다. 이것이 단품조립생산의 벽이다. 단순히 생각하면 그림 4와 같이 마크로한 크기의 공작기계가 계속해서 자기 자신의 축소판을 만들어가면 미소한 기계가 자동적으로 얻어진다고 생각된다. 그러나 이러한 발상에는 여러가지 무리가 있다. 먼저 제일은 생산능률과 코스트의 문제이고, 단품의 작은부품을 만들고 매우 작은 조립오차로 조립하는 것은

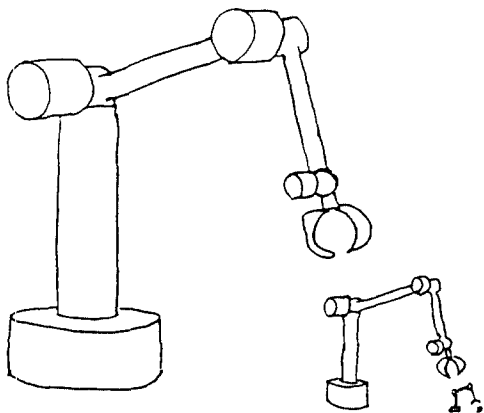


그림 4 차례로 작은 기계를 만들어 마이크로머신에 도달하는 방법

굉장히 비용이 들고 생산성이 나쁘다.

다음으로, 위에서 기술한 스케일링법칙에 문제가 있어서 기계의 상대적인 형태와 구동 방법을 크기에 맞추어서 변경해나가야 된다. 또 아무리 전체의 치수를 축소해도, 기계의 절대정도는 변화하지 않는 점에 유의하는 것이 필요하다. 예를 들어서 $1\mu\text{m}$ 의 공작정도를 갖는 기계로 자기 자신의 반 크기의 복제를 만들었을 때 그 복제의 공작정도는 역시 $1\mu\text{m}$ 이다. 복제를 되풀이하는 중에 정밀도는 나빠지기는 해도 좋아지지는 않으며 끝내는 전체치수의 수십% 선까지 되어버릴 것이다. 기계에 관하여 잘 아는 독자는 “현재의 공작정도는 $1\mu\text{m}$ 이하의 것도 있다.”라고 말할지도 모르나 이러한 정도는 면이나 진원도에 관한 것이고 결코 미소하고 복잡한 부품을 제작할 때에 적용이 되는 것이 아닌것에 유의해 주었으면 좋겠다.

2.4 반도체 마이크로머시닝으로 벽을 깬다

이러한 상황을 타개하는 획기적인 기술이 될 것으로 기대되고 있는 것이 반도체 제조 프로세서를 확장하여 μm 오더의 기계시스템을 만드는 기술(반도체 마이크로머시닝)이다. 그림 5는 복사기로 복사를 하는 것처럼 해서 기계부품을 축소하는 것을 나타내고 있다. 이 경우에는 모든 치수가 상사적으로 작아지기 때문에 절대정도가 아니고 상대정도가 일정하며 원리적으로는 얼마든지 축소가 가능하다. 한계는, 축소하는 데에 사용되는 빛의 파장으로 정해지나, 현재 연구되고 있는 싱크로트론에서의 X선을 사용하면 0.1nm 라는 짧은 파장을 이용할 수 있다. 이러한 포토라소그러피라고 불리는 수법은 IC 제조용으로 널리 사용되고 있으나, 이 방법으로 미소한 기계를 만듦으로써 앞에서 기술한 마이크로화를 저해하는 벽을 타파하려고 여러가지 연구가 행해지고 있다.^(1,2) 먼저 스케일링에 관해서는 마이크로 영역에서 유리하게 되는 정전기력을 이용한 액츄에이터나

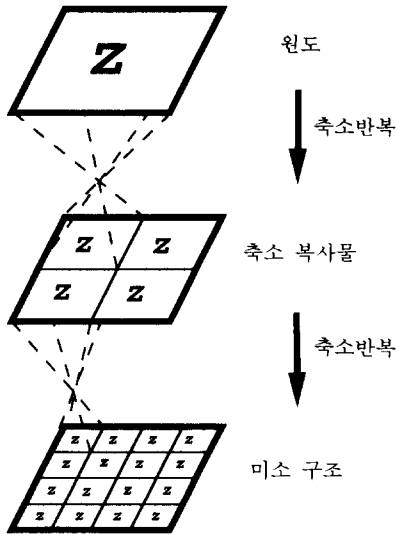


그림 5 포토리소그라피에 의한 미소시스템의 제작법

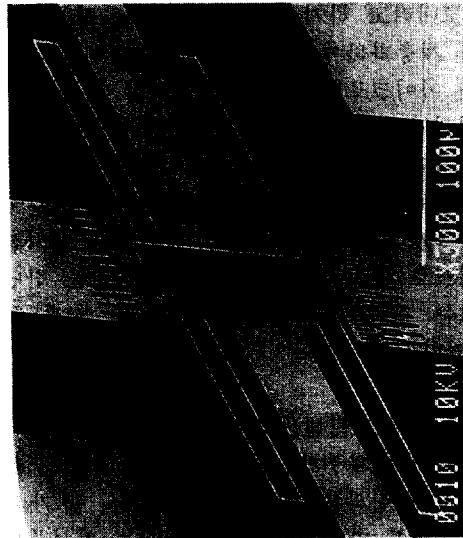


그림 6 0.5 μm의 갭의 다결정 실리콘 정전 액츄에이터⁽¹⁴⁾

압전소자, 형상기억합금 등 신재료를 이용한 액츄에이터가 시작되고, 마이크로화에 적합한 디바이스의 개발이 행해지고 있다. 압전소자에서는 전압을 가하면 변형률이 생기는 역압전효과를, 그리고 형상기억합금에서는 저온상에서의 큰 영구변형이 고온에서 상변태를 일으킴으로써 원래의 형상으로 돌아가는 형상기억효과를 각각 액츄에이터의 구동으로 이용하고 있다. 정보교환의 벽은, ③의 효과를 살려서 하나하나의 액츄에이터에 하위의 페루프 제어계와 정보처리계를 집적화함으로써 해결한다. 또, ①과 ②의 특징을 살려서 배치 프로세스에 의한 대량생산을 가능하게 함으로써 단품생산의 벽을 돌파한다.

그림 6에 저자들이 반도체 마이크로머시닝으로 만든 정전 액츄에이터의 예를 나타낸다.⁽¹⁴⁾ 4μm 두께의 다결정 실리콘 박막을 에칭하여 만들어 놓았다. 중앙에 있는 가동부는 이중으로 구부러진 보로 양쪽에서 지지되고 있으며 구동력의 발생부분은 빗살을 두 개 서로 어긋나게 맞물리게 한 것과 같은 구조로 되어 있다. 프로세스를 잘 조정함으로

써 단 한 장의 마스크로 이 모양을 만들 수 있다. 두 개의 빗살 사이에 전압을 가하면 빗살과 빗살이 더 겹쳐지려고 하는 방향으로 힘이 작용한다. 전압의 주파수를 기계적인 공진주파수(10~100kHz)에 일치시켜서 진동시키거나, 10V 정도의 직류전압을 가하여 7μm 정도의 변위를 얻을 수 있다.

그러나 반도체 마이크로머시닝은 종래의 기계기술에 비하여 크기도 제작방법도 전혀 다른 새로운 기술이기 때문에 회의적인 시각을 갖거나 당황함을 느끼는 분도 있을 것 같다. 저자가 들은 범위 내에서는 다음과 같은 논점이 있다.

- ① 재료가 실리콘에 한정되어 있어서는 곤란하다.
- ② 박막을 가공한 평면적인 구조밖에 얻을 수 없다.
- ③ 마이크로로 세계에서 잘 움직이는 마이크로머신의 시스템 구조의 이미지가 떠오르지 않는다.
- ④ 힘이나 구조가 너무 작아서 어디에 응용하면 좋을지 모른다.

이하에서는 이러한 논점에 대하여 최신의 기술의 발전이 어디까지 답을 내주고 있는지에 대해서 기술해보고자 한다.

3. 마이크로머신의 재료

먼저 가장 널리 사용되고 있는 실리콘이나 그 산화막, 질화막에 대하여 그 장점과 단점을 열거해 보자.

기계적 특성으로는, '가볍다, 녹이 슬지 않는다, 좋은 탄성체이다.' 등의 장점이 있다. 반면에 '취약하다, 마찰이 크고 마모되기 쉽다' 등의 단점이 있다. 기능 재료서는 전자회로를 집적화할 수 있는 것이 최대의 매력이다. 반면 액추에이터로서 사용하기에는 전장이나 자장을 발생시키는 구조를 고안할 필요가 있다. 또 불순물의 주입으로 전도성을 높이거나 산화막 등의 형성으로 절연을 시키거나 할 수 있는 이점이 있다. 그러나 자성체로는 사용할 수 없다.

가공성에 대해서는 IC프로세스가 확립되어 있기 때문에 서브마이크로미터 오더의 미세 가공과 수천 개에 달하는 디바이스의 일괄가공이 가능한 장점이 있다. 이때까지의 연구

에서는 기존의 기술을 최대한으로 이용하기 위하여 실리콘 박막을 가공하여 정전기장에서 구동하는 마이크로 액추에이터가 다수 발표되었다. 앞으로도 전자회로나 센서와의 집적화에 의한 마이크로 지능화 운동시스템⁽¹⁵⁾의 실현에는 실리콘이 맨 먼저 사용될 것으로 생각이 된다.

그러나 응용분야에 따라서는 위에서 상술한 결점이 장해가 되는 경우가 있기 때문에 다른 재료도 필요로 하게 된다. 현재까지 사용된 실례가 있는 재료로는 다음과 같은 것이다. 구조재료로서 폴리이미드 등의 고분자 재료나⁽¹⁶⁾ 텅스텐,⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ 몰리브덴, 니켈,⁽²⁰⁾ 동,⁽²¹⁾ 금 등의 금속재료가 있다. 또, 액추에이터 기능을 가지는 재료로서 수정, 산화아연, PZT 등의 압전재료나 TiNi 등의 형상기억합금이 있다.^(25,26) 마찰을 경감하기 위한 윤활막으로서 질화실리콘⁽¹¹⁾(Si₃N₄), 다이아몬드상탄소⁽²⁷⁾(DLC) 등의 경도 높은 재료가 사용되고 있다. 표 1에 이상의 사항을 나타내었다. 이들 중 잘 연구되고 있는 것에 대하여 간단히 기술한다. 폴리이미드는 스피닝 코팅방법으로 간단하게 만들 수 있으며 몇 개층을 중복시켜서 수십 마이크로미터까지

표 1 마이크로머신에 사용되는 재료와 특성

명 칭	용 도	프로세스	특 징
폴리이미드	구조재	반도체 프로세스	막형성이 용이, 유연하다.
텅스텐	구조재	반도체 프로세서	불화수소에 용해되지 않는다. 취약하지 않다.
몰리브덴	구조재	반도체 프로세스	취약하지 않다.
Ni, Cu, Au	구조재	전기도금	LIGA 프로세스로 두꺼운(0.1mm 이상) 구조제작가능.
수 정	액 추에이터	이방성 에칭	압전성 있음, 절연물
ZnO	액 추에이터	반도체 프로세스	압전성 있음.
PZT	액 추에이터	후막 프로세스	압전성 큼.
TiNi	액 추에이터	반도체 프로세스	형상기억합금
Si ₃ N ₄	윤활막	반도체 프로세스	
DLC	윤활막	반도체 프로세스	(다이아몬드상 탄소막)

두껍게 할 수 있으므로 쉽게 두꺼운 마이크로 구조를 구하는데 적합하다. 또 실리콘 등에 비하여 유연하기 때문에 가동체를 탄성지지할 때 작은 힘으로 큰 변위를 얻을 수 있다. 또 절연물로서도 이용할 수 있다. 수정은 시계 등의 진동자로서 잘 사용되기 때문에 단결정기판의 입수가 용이하다. 수정은 중불화암모늄액에 대하여 결정방위면에 따라 용해하기 쉬운 정도가 다른 이방성 에칭 특성이 있으므로⁽²⁸⁾ 용해하기 어려운 면이 수직벽과 일치하는 패턴을 선택하면 이 기판에서 여러가지 두꺼운 마이크로 구조를 만들 수 있다. 또 수정은 전압을 가하면 신축하는 역압전효과가 있기 때문에 그대로 액츄에이터로 사용할 수 있는 이점도 있다. 또 투명하기 때문에 광학재료로도 유용하다.

광학적응용에는 화합물반도체의 마이크로머시닝도 중요하다. 갈륨비소(GaAs)를 구조재, AlGaAs를 분리층(구조재로 만든 부분 사이에 끼워넣고 그 후에 거기만 용해시켜서 부품이 자유롭게 하는 층 : sacrificial layer)의 재료로 하는 표면 마이크로머시닝법으로 중심축 주변을 회전하는 기어⁽²⁹⁾나 마이크로파용의 스위치와 필터⁽³⁰⁾가 만들어지고 있다. 또 GaAs의 양자 레이저와 포토다이오드나 렌즈를 모두 마이크로머시닝으로 만든 집적형 레이저 엔코더도 시작되고 있다.⁽³¹⁾

나중에 기술할 LIGA프로세스를 이용하면 니켈, 동, 금 등의 금속을 전기도금시켜 두꺼운 마이크로 구조를 얻을 수 있다. 실리콘에서는 만약 과대한 힘이 가해지는 경우 약간 취약한 결점이 있으나 금속은 항복현상 때문에 변형은 해도 완전히는 파괴되지 않으므로 용도에 따라서는 유용할 것이다.

TiNi는 형상 기억효과를 이용한 대변형 액츄에이터로서 주목받고 있다. 최근, 스펙터링 방법으로 박막을 만들 수 있게 되었으므로 반도체 마이크로머시닝으로 가공할 수 있게 되어 집적화의 가능성이 높아졌다. TiNi뿐만 아니라 되도록이면 많은 재료에

반도체 마이크로머시닝의 이점을 살릴 수 있도록 공정의 개발도 필요하다.

4. 3차원적 마이크로 구조의 제작

표면 마이크로머시닝법은 구조의 두께가 4 μ m 정도이고 입체구조라고 해도 매우 납작하고 기판표면에 널리 퍼지는 것뿐이라는 단점이 있었다. 이 때문에 여러가지 방법을 고안해서 3차원적 마이크로구조를 만드는 시도가 행해지고 있다. 먼저, X선을 사용한 깊은 리소그라피와 같은 전해도금으로 에스펙트레이쇼(높이/폭의 비)의 미세구조로 만드는 LIGA(Lithograph Galvanformung Abformung)프로세스라고 불리는 구조형성법이 있다.

그림 7은 기본적인 구조의 공정을 나타낸다. 먼저 아크릴수지(PMMA) 등의 X선용 감광제(포토레지스트)층을 원하는 두께(0.1~1 mm 정도)로 기판상에 형성한다. 금

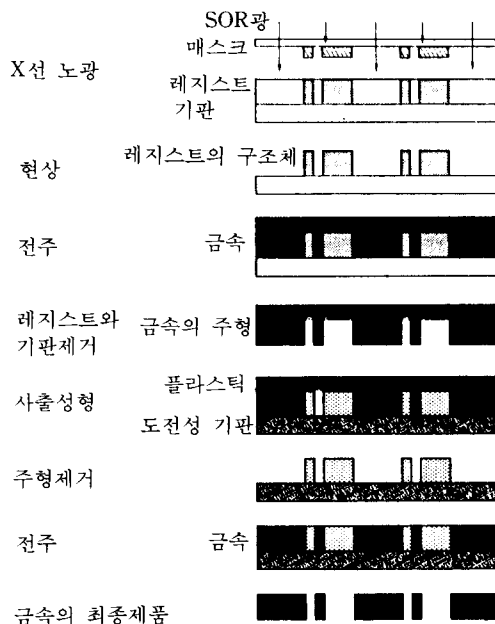


그림 7 LIGA 프로세스의 기본공정

등의 중금속의 흡수제를 바탕으로 하는 마스크를 사용하고 싱크로트론방사의 X선(XOR광)으로 레지스트를 노광한다. XOR광은 직진성, 해상도, 투과성이 뛰어나기 때문에 두꺼운 레지스터에 대하여 μm 이하 정도로 노광이 가능하다. 그 후 형성하여 레지스터의 구조가 만들어진다. 다음으로 전체를 도금액에 담그고 전도성의 기판 위에 전기도금으로 니켈, 금 등을 레지스터 구조의 파여진 부분에 두껍게 쌓이도록 한다(전주). 더욱이 이 금속을 금형으로 하여 사출성형으로 플라스틱으로 모양을 옮긴다. 이렇게 해서 1회에 XOR노광으로 만들어진 원형에서 원하는 만큼의 개수의 플라스틱제품을 만들 수 있다. 또 이 사출성형으로 만든 플라스틱형을 이용해서 그 위에 전주로 금속의 구조를 만들 수 있다. 세라믹으로서 PZT나 ZrO_2 를 사용한 예가 있다.

이 때까지 기술한 구조는 모두 기판에 고정되고 있다. 그러나 기어인 경우에는 샤프트에 부착시켜 회전시켜야만 뜻이 있다. 그래서 움직일 수 있는 구조를 만들기 위해 소위 분리층의 기수를 LIGA프로세스에서 채용하고 있다.

그림 7에서 마지막으로 금속의 구조를 전주로 만들기 이전에 어떤 부분만은 기판의 위에 용해하기 쉬운 분리층을 얇게 붙여 놓는다. 마지막으로 플라스틱의 부분을 먼저 제거하고 다음에 분리층을 선택적으로 용해시키면 거기에 금속구조만을 기판에서 분리하여 움직일 수 있게 된다. 외팔보와 중심축에 끼워진 그림 8과 같은 공기터빈 등의 예가 있다.

이상과 같이 LIGA 프로세스는 큰 Aspect Ratio의 미세구조를 여러가지 재료로 만들 수 있는 점이 큰 장점이다. 그러나 OR을 이용하는 것은 일반적으로 어렵기 때문에 자외선의 광리소그래피나 반응성이온에칭에 의한 수직벽을 가진 마이크로구조를 대신해서 이용할 수도 있다. 이러한 대체 LIGA 프로세스

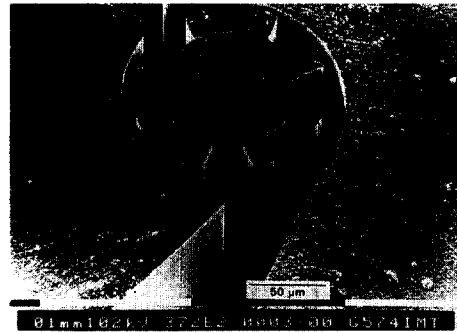


그림 8 LIGA 프로세스에 의한 공기터빈⁽³²⁾

서의 경우에는 높이 $50\mu\text{m}$ 정도의 구조까지 만들 수 있다.

그리고 다음에 실리콘의 광막을 조합시켜서 입체 구조를 만드는 방법이 있다. 국민학교에서 공작수업을 회상해보면 이해하기 쉬울 것이다. 두꺼운 도화지에 전개도를 그리고 그것을 오려낸 다음 구부려서 입체구조를 만든 적이 있을 것이다. 이것과 같은 방법으로 실리콘 판막상에 전개도를 포토리소그래피와 에칭으로 만들고 광막의 밑에 분리층을 용해시켜서 분리한 다음 각각 면을 끌어올리고 입체적인 구조로 조립시키면 마이크로의

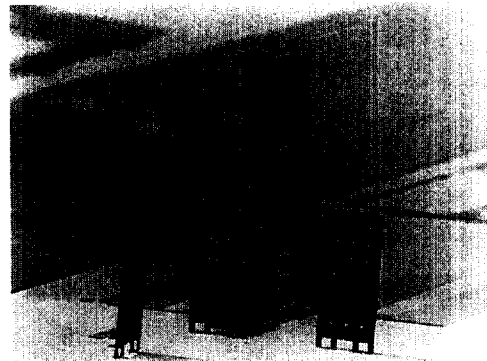
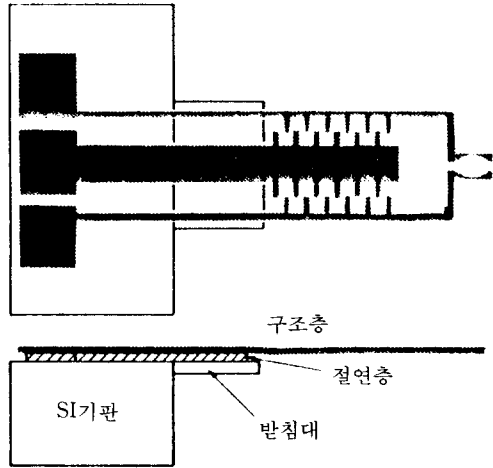


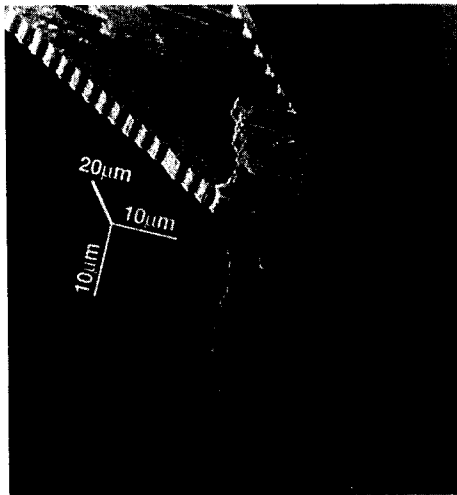
그림 9 실리콘 박막($2\mu\text{m}$)을 기판에서 일으켜 세워서 만든 풍속계.

* 변의 길이 $2\mu\text{m}$ 의 4각형 단면을 가진 길이 $200\mu\text{m}$ 의 실리콘선에 전류를 흘려서 바람에 의한 냉각효과를 측정한다.

입체구조가 만들어진다. 면과 면 사이의 구부러지는 부분에는 폴리이미드의 탄성 힌지를 사용하거나,⁽³³⁾ 다결정 실리콘으로 만든 마이크로 경첩을 사용한다.⁽³⁴⁾



(a) 개념도



(b) 선단의 전자현미경

This microgripper, made by C.-J. Kim, A. P. Pisano and R. S. Muller of Berkeley Sensor & Actuator Center, Holds a Euglena(single cell protozon, $7 \times 40 \mu\text{m}$), preserved by K. D. Lee.

그림 10 다결정 실리콘으로 만든 마이크로핀셋⁽³⁶⁾

그림 9에 후자의 예를 나타낸다. 가는 선이 약간 큰 구조에 의해서 지탱되어 있고 공중에 걸려 있다. 풍속계로서 응용가능한 구조이다. 이 밖에도 육면체나 나비의 날개와 같은 구조 등⁽³³⁾ 여러가지가 시작되고 있다.

실리콘 기판의 단면에서 마이크로 구조가 튀어나온 구조로 만들어지고 있다. 그 좋은 예는 정전 리니어 액츄에이터이고 탄성변형하는 마이크로 핀셋을 움직이게 하는 것이다. 구동부분은 소위 빗살모양의 액츄에이터⁽³⁵⁾라고 불리는 것이고 구동력의 발생부분은 빗살 두 개를 맞물리게 한 것과 같은 구조가 되고 있다. 두 개의 빗살 사이에 전압을 가하면 빗살과 빗살이 더 겹쳐지려고 하는 방향으로 힘이 작용한다. 두께 $2\mu\text{m}$ 정도의 다결정 실리콘으로 만든 구조가 길이 $400\mu\text{m}$ 정도 기판의 가장자리에서 튀어나와 있다. 그 구조는, 서서히 굽어지는 받침대 위에 만들어져 있고 그 전부터 있는 수동의 마이크로 매니플레이터의 끝에 부착할 수 있게 되어 있다. 그림 10은 길이 $20\mu\text{m}$ 정도의 박테리아를 이 핀셋으로 잡은 사진이 소개되어 있다.⁽³⁶⁾

더 특수한 가공으로는 전자빔이나 레이저 빔을 이용하여 선상의 마이크로 구조를 만들 수 있다. 가스중에서 가공한 예⁽³⁷⁾나 액체중에서 가공한 예가 있다. 후자의 경우 자외선 경화수지를 자외선광의 스폿으로 고화시켜 그 스폿을 삼차원적으로 주사함으로써 입체 구조를 만든다. $0.1 \times 0.1 \times 1\text{mm}^3$ 의 구부러진 중공각주나 직경 $50\mu\text{m}$ 의 코일 스프링 등이 만들어져 있다.⁽³⁸⁾

5. 병렬협조형 마이크로운동시스템

5.1 미니시스템 지향의 아키텍처

현재 마이크로머시닝 기술을 이용하고 제작되는 마이크로 액츄에이터에서는 마찰이 큰 문제가 되고 있다. 마찰 때문에 기어나 링크기구를 조합시킨 형태로 외부에 대하여

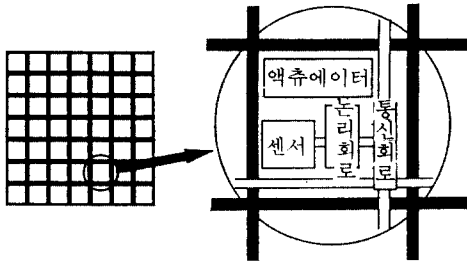


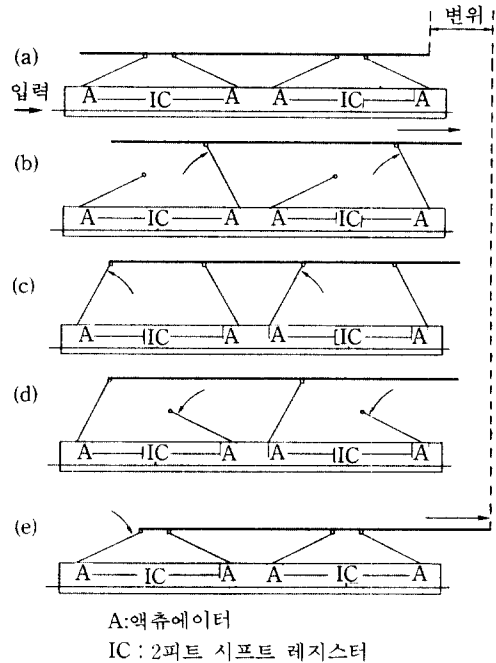
그림 11 센서 액츄에이터 전자회로를 포함한 스마트 모듈로 구성된 병렬 협조형 미소시스템

일을 하게 되면 손실이 크고 효율이 나빠진다. 그러나 다수의 같은 마이크로 액츄에이터를 직·병렬로 조합시켜서 시스템을 구축하면 각각의 액츄에이터의 동작이 단순하다 하더라도 그러한 액츄에이터가 협조적으로 움직이므로써 전체로서는 복잡한 동작을 실현시킬 수 있다. 예를 들어서 단순히 신축할 뿐인 액츄에이터를 직렬로 사용하고 순서대로 신장·수축·고정의 사이클을 되풀이함으로써 송충이와 같이 계속 앞으로 갈 수 있는 기구를 만들 수 있다.

상기된 바와 같은 생각에 따라 우리는 마이크로 세계에 적합한 구조로서 병렬협조형 마이크로 운동시스템을 제안하고 있다.⁽³⁹⁾ 이것은 센서, 액츄에이터, 논리회로를 같은 프로세스로 일체화한 모듈을 만들고 같은 모듈을 다수직렬 혹은 병렬로 결합한 시스템이다. (그림 11을 참고하기 바란다.) 각 모듈은 서로 협조적으로 동작하여 전체로서 하나의 일을 수행하게 된다. 또한 이 시스템은 모듈 내부에 부분적인 정보처리계와 제어계를 가지기 때문에 이들을 집적화한 시스템에서는 외부에서 개개의 모듈을 제어할 필요는 없으며 제어에 필요한 통신량을 대폭 감소시키는 것이 가능하게 된다.

5.2 섬모운동 시스템

병렬 협조형 마이크로 운동시스템의 구체



A:액츄에이터
IC: 2비트 시프트 레지스터

그림 12 인공섬모 시스템의 동작:

그림 중에서 IC라고 표시된 2비트 시프트 레지스터에 대하여 우측의 액츄에이터가 하위 비트에, 좌측이 상위비트에 대응하며, 비트가 1일 때 액츄에이터는 위로 올라간 상태라고 함. (a)에서는 레지스터의 내용이 00이고, (b) 01, (c) 11, (d) 10, (e) 00의 순으로 변한다.

적인 예로서, 생물의 운동에서 힌트를 얻은 섬모운동에 대하여 설명한다. 섬모운동이란 생물의 표피에 있는 다수의 털과 같은 돌기(섬모)가 서로 동기되면서 진동하여 액체나 기체의 흐름을 만들어 내거나, 단세포 생물의 경우에는 그 자체가 이동하거나 하는 것이다. 이것을 외팔보가 상하로 진동하는 액츄에이터를 가지런히 늘어 놓고 공학적으로 실현시킨 것이 섬모운동 시스템이다. 예를 들면, 판을 운반하는 것과 같은 동작은 그림 12에 나타낸 것과 같은 두 개의 외팔보형 액츄에이터와 논리회로를 갖는 모듈을 이용하여 실현시킬 수 있다. 그림 12에서 알 수 있

듯이 이 운동의 제어는 간단한 시프트 레지스터로 실현시킬 수 있다. 이 IC의 제작은 액츄에이터와의 집적화를 제외하면 용이하므로 이 시스템에 있어서 최대의 문제가 되는 것은 액츄에이터의 제작이다.

5.3 열팽창 외팔보 액츄에이터

열팽창을 이용한 바이메탈형의 외팔보 액츄에이터는 이미 독일의 Fraunhofer연구소의 Benecke 등에 의해서 제작되고 있으나 그 프로세스는 꽤 복잡하다.⁽⁴⁰⁾ 그래서 본 연구에서는 외팔보의 재료로서 폴리이미드를 사용하기로 했다. 그림 13은 제작한 길이 500 μ m의 열팽창 외팔보 액츄에이터의 주사형 전자 현미경(SEM) 사진이다. 이 액츄에이터는 두 종류의 열팽창률이 다른 폴리이미드로 이루어진 외팔보와 금속 저항선의 히터로 구성되어 있다. 히터는 두 개의 폴리이미드 사이에 끼어 있다. 외팔보는 길이 500 μ m, 폭 100 μ m, 두께 6 μ m이고 그림 13에 나타난 바와 같이 초기 상태에서 잔류응력 때문에 기판 윗방향으로 약 250 μ m 휘어져 있다. 저항선에 전류를 흘리면, 외팔보는 주울 열에 의해서 가열된다. 가열된 외팔보는 바이메탈과 같이 두 종류의 폴리이미드의 열팽창의 차이에 의해서 기판 아래 방향으로 휘게 된다. 30mW의 소비전력으로 수직방향으로 70 μ m, 수평방향으로 120 μ m의 변위를 얻

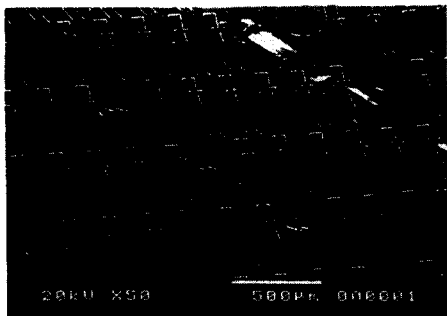


그림 13 섬모운동시스템용 바이메탈형 액츄에이터

었다. 0~0.6V의 계단과 전압을 인가했을 때의 주파수 특성을 측정하였다. 실험은 상온에서 자연 냉각 상태에서 이루어졌고 14 Hz에서 3dB 진폭이 작아졌다. 이 외팔보 액츄에이터를 그림 12에 나타난 바와 같이 차례대로 움직이게 함으로써 2 \times 4 \times 0.4mm³의 작은 실리콘 기판을 움직일 수 있는 것을 확인했다.

6. 마이크로머신의 응용

마이크로머신은 다음과 같이 응용할 수 있는 것으로 기대되고 있다.

- ① 전체의 크기가 작은 것을 살려서 혈관 내와 같은 마이크로 세계에 들어간다.
- ② 세포나 DNA와 같은 생체 고분자 등 마이크로한 대상을 취급한다.
- ③ 모기에 물렸을 때 정도의 혈액으로 분석을 하는 것과 같은 극미량의 유체를 취급한다.
- ④ 디스크 장치처럼 정해진 위치에 표시가 있는지 없는지를 검출한다.
- ⑤ 인간의 피부표면에 감각기가 분포하는 것처럼 표면에 센서나 액츄에이터가 분포한 디바이스를 이용하여 생체의 정보를 세밀하게 채취하거나 그것을 이차원적으로 자극하거나 한다.
- ⑥ 유출한 원유와 같이 넓은 범위에 걸쳐서 분사된 대상을 대량의 마이크로머신을 이용하여 취급한다.

위에서 기술한 것 중에서 실현 가능성이 높은 것을 그림 14에 나타낸다. 실리콘으로 현재 만들고 있는 마이크로 부품은 매우 얇으므로 예를 들어서 마이크로머신으로 수술을 하여 나쁜 부분을 제거해버린다는가 하는 외부에 큰 힘을 내는 일은 아직은 어렵다.

이 때문에 되도록이면 시스템의 내에서 일을 마칠 수 있는 응용이 바람직하다. 예를 들면 거울⁽⁴¹⁾을 움직이게 한다든지 광섬유⁽⁴²⁾를 움직이게 하여 광로를 조정한다든지 미소

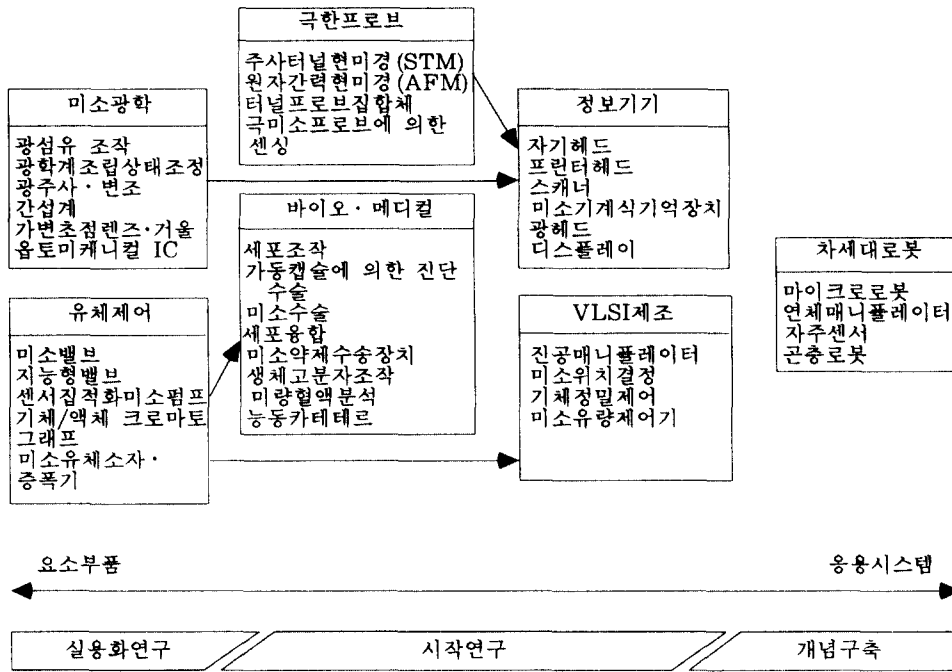


그림 14 마이크로머신의 응용⁽¹⁾

한 간섭계를 만든다든지 디스플레이에 사용하는 등 광학분야에의 응용이 먼저 생각할 수 있는 하나의 지름길이라고 생각된다. 이때문에 본 분야를 마이크로메카네틱스라고 명명하여 특히 연구를 추진해야 된다고 생각하고 있다.

다음으로 세포나 생체 고분자의 조작⁽⁴³⁾을 생각할 수 있다. 세포는 수 μm 에서 수십 μm 의 직경이고, 생물의 유전 정보가 축적되어 있는 DNA 분자의 길이도 십수 μm 이기 때문에 미소한 유로 속을 한 개씩 차례로 운반하거나 미세한 전극으로 전장을 가하여 정렬시키거나 할 수 있다. 분자나 원자를 화학적으로뿐만 아니라 물리적으로도 취급할 수 있는 것이다.

그리고 마이크로 펌프나 마이크로 밸브를 만들 수 있으면, ⁽⁴⁴⁾ 가는철사의 끝에 붙인 작은 캡슐에 넣은 약을 환자의 몸속에서 환부에 가까와 졌을 때 반출하게 함으로써 치료

효과를 상당히 높일 수가 있다. 또 마이크로머신을 몸속에서 순환시켜서 환부에 도달했을 때 체액을 채취하고 그것을 검사에 사용한다든가 하는 것도 가능해질 것이다. 유체를 제어하여 의료에 응용한다는 것이 세번째 큰 응용이다. 네번째로 분자의 형상이나 시료 표면에 정렬되어 있는 원자의 정렬방식을 표면의 형상에 따라서 예리한 바늘 끝을 움직이게 함으로써 관찰하는 주사프로브현미경이라고 불리는 특수한 현미경⁽⁴⁵⁾에의 응용을 생각할 수 있다. 주사프로브현미경 중에서 주사터널현미경 (STM)과 원자간력현미경은 널리 사용되고 있다. 진공장치 속과 같은 장소에서 매우 작은 프루브를 움직이게 하여 원자의 분해능으로 여러가지 성질을 측정하는 등 극소 마이크로한 과학의 분야에도 공헌할 수 있을 것이다.

예를 들어서 STM의 미동기구는 터널 전류를 제어하기 위하여 Z축 방향으로 탐침을

움직이게 하는 기구와 시료 표면을 주사하기 위하여 X-Y표면 내에서 탐침을 움직이게 하는 기구이며 Z축 및 X,Y축의 가동 범위는 각각 10pm~1 μ m 및 0.1nm~ μ m라고 되어 있다. 이 때문에 종래의 마이크로한 기구를 조합시킨 STM으로는 방진이나 열적인 드리프트 대책으로 대단히 고생을 하고 있는 실정이다. 여기서 마이크로 액츄에이터를 이용하여 미동기구를 미세화하면 미동기구에서 생기는 이러한 문제는 대폭 경감될 것이다. 또 전류 앰프를 탐침의 바로 옆에 모아 놓음으로써 전기적인 잡음에 대해서도 강해진다. 마이크로머시닝으로 만든 외팔보형 액츄에이터를 STM의 미동기구에 사용한 예⁽²³⁾나 빗살형 마이크로 액츄에이터, 터널 탐침 및 이와 마주 보는 면을 실리콘 기판 위에 집적한 마이크로 터널 전류 유닛⁽⁴⁶⁾ 등이 보고되어 있다.

이상과 같이 외부와 너무 큰힘의 상호작용이 없는 분야에서의 응용이 수년 후에는 실용화되리라 생각된다.

7. 맺음말

이상 해설한 바와 같이 마이크로머신의 기술은 빠른 속도로 진보되고 있으며 광학관계를 비롯해서 생명, 유체, 표면과학 등에의 응용도 유망하고 응용 제품이 만들어지는 날도 가까와지고 있다. 여기서 소개한 반도체 기술을 바탕으로 한 접근 방법 외에 정밀기계 가공을 이용하여 mm 크기의 기계를 만들거나, 분자기계를 유전자공학의 수법으로 만들려고 하는 시도 등 여러가지 접근 방법도 행해지고 있으며 앞으로의 발전이 한층더 기대된다.

참고문헌

(1) 藤田, 1992, “마이크로마신의 세계,” 工業調査會.

- (2) 江刺, 五十嵐, 杉山, 藤田, 1992, “マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス,” 培風館.
- (3) 林, 1988, “微小走行機械,” 精密工学会誌5, 4卷, 1646~1650頁.
- (4) 福田, 外, 1991, “管内検査ロボットの研究 第4報,” 日本機械学会論文集(C編) 57卷, 1661~1666頁.
- (5) 竜江, 外, “マイクログリップシステム,” 日本ロボット学会誌 8卷, 498~500頁.
- (6) 福田, 外, 1990, “マイクロマニピュレータの制御 第4報,” 日本機械学会論文集 56卷, 3287~3293頁.
- (7) Petersen, K. E., 1982, “Silicon as a Mechanical Material,” Proc. IEEE, Vol. 70, pp. 420~457.
- (8) Fan, L. S., Tai, Y. C. and Muller, R. S., 1988, “Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators,” IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35, pp. 724~730.
- (9) Mehregany, M., Gabriel, K. J. and Trimmer, W. S., 1988, “Integrated Fabrication of Polysilicon Micro-mechanisms,” IEEE Trans. on Electron Devices, ED-35, p. 719.
- (10) Fan, L. S., et al., 1989, “IC-processed Electrostatic Micromotors,” Sensors & Actuators, Vol. 20, pp. 41~48.
- (11) Tai, Y.C., et al., 1989, “IC-processed Electrostatic Synchronous Micromotors,” Sensors & Actuators, Vol. 20, pp. 49~56.
- (12) 金, 桂井, 藤田, 1991, “Y-Ba-Cu-O超電導体を利用した浮上型リニアアクチュエータの基礎研究,” 低温工学, 26卷, 1号, 37~45頁.
- (13) 樋口, 外, 1988, “圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構,” 精密工学会誌 54卷, 11号, 2107~2112頁.
- (14) Hirano, T., Furuhashi, T., Gabriel, K. J.

- and Fujita, H., 1992, "Operation of Sub-Micron Gap Electrostatic Comb-drive Actuators," ASME/IEEE J. on Micro Electromechanical Systems, Vol. 1, pp. 52 ~59.
- (15) 原島, 江刺, 藤田編著, 1991, "マイクロ知能化運動システム-マイクロマシンの工学的実現," 日刊工業新聞社.
- (16) 特集 "動くシリコンへ," 日経エレクトロニクス, 1989年 8月21日号 125頁
- (17) Busta, H. H., et al., 1987, "Strings, Loops and Pyramids-Building Blocks for Microstructure," Micro Robots & Teleoperators Workshop, Hyannis, Ma.
- (18) Chen, L. Y., et al., 1989, "Selective Chemical Vapor Deposition of Tungsten for Micro Dynamic Structures," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Salt Lake City, USA, pp. 82 ~87.
- (19) Chen, L. Y. and MacDonald, N. C., 1991, "A Selective CVD Tungsten Process for Micromotors," Tech. Digest of 6th Internatl Conf. on Solid-State Sensors and Actuators(Transducers'91), San Francisco, USA, pp. 739~742.
- (20) Ehrfeld, W., 1990, "The LIGA Process for Microsystems," in Micro System Technologies 90-Proceedings of 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Ed. H. Reichl, Berlin, Springer-Verlag, pp. 521~528.
- (21) Becker, E. W., et al., 1986, "Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratio and Great Structural Height by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanforming, and Plastic Moulding(LIGA Process)" Microelect. Engin. Vol. 4, pp. 35~56.
- (22) Delapierre, G., 1990, "Micromachining : Silicon of Course, but Other Materials Too," in Integrated Micro-Motion Systems-Micro Machining Control and Applications, ed. F. Harashima, Elsevier Scien. Publ, pp. 117~136.
- (23) Akamine, S., et al., 1990, "A Planer Process for Microfabrication of a Scanning Tunneling Microscope" Sensors & Actuators, A21-A24, pp. 964~970.
- (24) Udayakumar, K. R., et al., 1991, "Ferroelectric Thin Film Ultrasonic Micromotors," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan, pp. 109~113.
- (25) Walker, J. A., et al., 1990, "Thin-film Deposition of TiNi Shape Memory Alloy," Sensors & Actuators, A21-A23, pp. 243 ~246.
- (26) 宮崎, 石田, 1993, "形状記憶合金薄膜," 金属, 63卷 3号 9~13頁.
- (27) Suzuki, S., et al., 1991, "Friction and Wear Studies on Lubricants and Materials Applicable to MEMS," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan, pp. 143~147.
- (28) 植田, 外, 1987, "水晶のエッチング形状の予測法とそのデバイス設計への応用," 計測自動制御学会論文集 23巻, pp. 1233 ~1238.
- (29) Hjort, K., et al., 1992, "Epitaxial Regrowth in Surface Micromachining of GaAs," Proc. of Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical System '92 Travemunde(Germany), pp. 83~86.
- (30) Larson, L. E., et al., "Microactuators for GaAs-Based Microwave Integrated Circuits," Transducers '91, pp. 743~746.
- (31) Sawada, R., et al., 1991, "Fabrication of Active Integrated Optical Micro-Enco-

- der," Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Nara(Japan), pp. 233~238.
- (32) Mohr, J., et al., 1990, "Movable Microstructures Manufactured by the LIGA Process as Basic Elements for Microsystems," in Micro System Technologies '90 Proc. of 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Ed. H. Reichl, Berlin, Springer-Verlag, pp. 529~537.
- (33) Suzuki, K., et al., 1992, "Creation of Insect-Based Microrobot with an External Skeleton and Elastic Joints," Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92, Travemunde(Germany), pp. 190~195.
- (34) Pister, K. S. J., 1992, "Hinged Polysilicon Structures with Integrated Cmos Tfts," IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, pp. 136~139.
- (35) Tang, W. C., et al., 1990, "Electrostatic-Comb Drive of Lateral Polysilicon Resonators," Sensors & Actuators, A21-A23, pp. 328~331.
- (36) Kim, C. J., Pisano, A. P. and Muller, R. S., 1992, "Silicon-Processed Overhanging Microgripper," IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, pp. 31~36.
- (37) Westberg, H., et al., 1991, "Truly Three-Dimensional Structures Microfabricated by Laser Chemical Processing," Transducers' 91, pp. 516~519.
- (38) Ikuta, K. and Hirowatari, K., 1992, "Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding," Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '93, Fort Lauderdale, FL, pp. 42~47.
- (39) Fujita, H., Gabriel, K. J., 1991, "New Opportunities for Micro Actuators," Tech. Digest 6th Intern' l Conf. Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, CA, pp. 14~20.
- (40) Riethmuller, W. and Benecke, W., 1988, "Thermally Excited Silicon Microactuators," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-34, pp. 758~763.
- (41) Hornbeck, L. J., 1989, "Deformable-Mirror Spatial Light Modulators" SPIE Critical Review Series Vol. 1150, pp. 86~102.
- (42) Kikuya, Y., et al., 1992, "Miro Alignment Machine for Optical Coupling," Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '93, Fort Lauderdale, FL, pp. 36~41.
- (43) 増田閃一ほか, 1989, "静電気による細胞造作," 応用物理58巻 383~390頁.
- (44) Nakagawa, S., et al., 1990, "Integrated Fluid Control Systems on a Silicon Wafer," in Micro System Technologies '90 - Proc. of 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components, Ed. H. Reichl, Berlin, Sept. 10~13, Springer-Verlag, pp. 793~798.
- (45) 森田, 1991, "走査型プローブ顕微鏡," 工業調査会.
- (46) Kobayashi, D., Hirano, T., Furuhashi, T. and Fujita, H., 1992, "An Integrated Lateral Tunneling Unit," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Travemunde, Germany, pp. 214~219. 