

21 세기 Robot 사회 창조를 위한 기술전략

: 나노핸들링 로봇기술

원제 - 21 세기에서의 Robot 사회창조를 위한 기술전략 조사보고서

원문 출처 - 일본 산업기술종합연구소

김덕호 (한국과학기술연구원)

- 목 차 -

1. 분석자 서문.....	(1)
2. 나노핸들링 로봇기술의 전망.....	(1)
2.1. 나노핸들링 로봇기술의 개요.....	(1)
2.2. 나노핸들링 로봇기술의 특징.....	(2)
2.3. 나노핸들링 로봇기술의 응용.....	(3)
3. 나노핸들링 로봇기술의 현황.....	(4)
3.1. 세포조작기술.....	(4)
3.2. 마이크로 수술.....	(4)
3.3. DNA 및 분자조작 기술.....	(4)
4. 유망한 적용분야와 system 개발 예.....	(5)
4.1. 세포조작의 자동화와 대량처리화.....	(5)
4.2. 의료분야.....	(5)
4.3. 마이크로 전자회로 및 마이크로머신 조립.....	(5)
4.4. 분자결합에 의한 결정성장.....	(6)
5. 분석자 결론.....	(6)

1. 분석자 서문

많은 전문가들은 2020 년 이전에 현재의 반도체 기술을 이용한 마이크로화는 한계에 이를 것이며, 향후 미세가공에서 미세조립으로 기술적 대전환이 일어날 것으로 예측하고 있다. 필자의 의견으로는 MEMS 기술을 기반으로 한 Top-Down Approach (미세가공)와 Bottom-Up Approach(미세조립)의 기술적 융합이 당분간 활발히 이루어지리라 생각한다. 나노핸들링 로봇기술의 궁극적인 목적은 원자나 분자를 자유롭게 관찰, 계측, 제어, 조작하여 신물질과 디바이스를 만들어내는 것으로서, 이는 다름아닌 나노 테크놀로지이다. 로봇기술은 21 세기에 기존의 제조업은 물론 나노 산업의 생산기술로 변모할 것으로 예상되며, 이러한 로봇 기술이 바로 본 보고서의 분석을 통해 다루려는 나노핸들링 로봇기술이다.

2. 나노핸들링 로봇기술의 전망

2.1 나노핸들링 로봇기술의 개요

1980년대 중반 이후 밀리미터 사이즈의 작은 머신과 로봇을 구성하는 연구개발이 주목됨과 동시에 반도체 가공기술을 응용해서 미소한 액추에이터(Actuator)와 센서 등을 제작하는 MEMS기

술이 크게 진전했다. 특히 일본에서 1990년대는 “마이크로 머신”을 키워드로, 미소한 액추에이터와 센서 등의 마이크로 콘포넌트(Component)와 마이크로 시스템화 기술이 개발되어 요소레벨에서는 큰 성과를 얻고 있다. 앞으로는 의료와 바이오, 플랜트 수리(Maintenance) 등의 새로운 산업분야로의 적용이 기대되고 있고, 이는 일본이 세계적으로 앞서 나갈 수 있는 분야이다.

미소한 대상물을 취급, 조작하는 기술은, 인공수정과 배아이식 등, 모든 세포조작 분야에 있어서 생물학자와 축산연구자, 의사 사이에서는 30년 이전부터 행해져 왔다. “마이크로 매니플레이션(manipulation)” 이라고 불리우는 이 기술은, 수십~수백 μm 정도의 수정란 등의 세포에 구멍을 만들어 그 안에 있는 핵을 꺼내거나, 다른 세포의 핵을 주입하는 작업을, 3자유도 정도의 위치결정 기구의 맨 앞 부분에 글래스침을 장착한 “마이크로 매니플레이터(manipulator)”를 이용하여 현미경으로 들여다 보면서 수동으로 이루어졌다. 마이크로 매니플레이터(manipulator)가 개발되기 전에는 당초 연구자가 수작업을 해 왔으나, 최근에는 시판되어 숙련자에 의해 수 μm 정도의 위치결정정밀도를 실현할 수 있게 되었다. 1997년에 개발되어 발표된 복제(clon)양 Dolly는 이 기술에 기초하여 만들어진 것이고, 생명과학의 새로운 발전이 기대되고 있으며, 마이크로 매니플레이션이 보다 고정밀도에서 높은 조작성이 더욱 요구된다. 연구개발 레벨에서는, 수 μm 정도의 대상물의 고정 및 위치결정을 서브 μm 이하의 위치결정 정밀도에서 이루어지고 자세제어도 이를 수 있는 고성능의 마이크로 핸드스가 개발되고 있어, 앞으로는 시각과 역각정보를 이용한 자동화로의 발전이 크게 기대된다.

1990년에 IBM에서는, 한 개의 원자를 원자간의 힘을 이용해서 조작하고, 원자열에 의한 문자를 작성했다. 원자 한 개 한 개의 조작이 원리적으로 가능하다는 것을 제시한 점에서 흥미롭다. 또한, 최근 카본 나노 튜브(carbon nanotube: CNT)라고 불리우는 직경이 수nm인 미세한 튜브가 개발되어, 이것을 AFM 탐침의 앞부분에 장착함에 따라 극소의 핀셋(Pincet)이 실현되고 있다. nm 수준의 초미세 물질의 조작과 가공에 적용될 것으로 기대된다.

의학분야에서는 절단된 말초신경과 미소혈관의 봉합작업의 기능을 외과 의사가 현미경의 도움을 받아 행하고 있다. 또한 앞부분에 다자유도 마이크로매니플레이터를 장착하고, 이것을 힘피드백을 갖춘 마스터암에 의해 복강경을 원격조작하고, 병부의 절제와 혈관봉합작업 등에 이루어지고 있으며, 수술의 저침습화(minimally invasive surgery)에 크게 기여하고 있다. 이는 의사의 고도기능과 장시간 긴장을 수반하는 작업에 의존하고 있기 때문에, 자동화로의 발전도 기대하고 있다.

이러한 모든 접촉형 조작과는 별도로, 서브 μm 이하의 보다 작은 대상물, 예를 들면 생체고분자와 DNA 등을 조작하기 때문에, 레이저의 광압력을 이용해서 대상물을 트랩(trap)하거나, 또는 제어된 전계 중에서 대상물에 유도전하를 발생시켜 이동 및 가공하는 방법 등의, 비접촉형 조작기술 개발도 이루어지고 있다. 또한 유체를 이용해서 미소대상물의 이동을 제어함에 따라, 분류와 선별, 또는 화학반응을 일으키는 수법도 계속해서 개발되고 있다. 이것은 TAS(Total Analysis System)라고 불리우며 실리콘 기판상에 미소한 유로와 펌프, 밸브를 구성하고 유체를 제어하며, 물질의 화학조성을 분석하거나, 모든 화학합성을 기판상에서 이루어지도록 하는 것으로, 병렬처리와 다량처리로 나아가고 있다고 말할 수 있다. 접촉형, 비접촉형 각각에 장단점이 있지만, 취급하는 대상물의 성질과 작업내용, 환경분위기에 따라 양자를 적절하게 사용함으로써, 여러 가지 미소대상물의 다양한 조작을 기대할 수 있다.

한편, 미소세계는 인간이 직접 보거나 만지거나 할 수 없으므로, 관찰과 센싱기술도 매우 중요하다. μm 수준에서는 광학현미경으로 관찰가능하지만, 서브미크론 이하의 영역에서는 분위기와 사용조건이 상당히 한정되어 고배율이 가능한 전자현미경에 의존하지 않을 수 없다. 일반적으로 현미경에서는 초점심도가 매우 낮고, 깊이 및 3D정보를 얻을 수 없으므로, 인간이 조작할 경우에 많은 불편이 따른다. 장초점심도화와 작동거리(working distance)의 확대, 3차원 시각정보의 취득 및 제시는 큰 과제로 되고 있다.

2.2 나노핸들링 로봇기술의 특징

그런데, 이러한 나노미터(nano metre)에서 마이크로미터에 이르는 미소대상물의 고정과 위치결

정, 가공 등 모든 매니플레이션에 관한 기술, 또는 미소영역의 관찰과 센싱을 포함한 기술을 마이크로/나노매니플레이션(micro/nanomanipulation) 기술이라고 한다면, 이 기술은 다음과 같은 몇 가지 점에서 종래 확립된 로봇기술과 다른 점이 많고, 그 적용분야와 파급효과가 큰 매우 유망한 로봇기술이라 할 수 있다.

우선 첫째, 미소한 대상을 취급할 수 있게 됨에 따라 새로운 영역으로의 다양한 접근이 가능하게 되고, 지금까지의 방법으로는 실현할 수 없었던 것이 가능하게 된 것이다. 바이오테크놀로지(BT)를 예로 든다면, 지금까지 취급되었던 레벨보다 더욱 작은 세포와 유전자 등에 있어서 다양한 조작이 가능하게 되고, 새로운 생명과 유용한 동식물이 실현될 가능성이 높아졌다. 또한 의료 분야에서는, 세포레벨에서의 선택적 진단과 치료가 이루어 질 수 있게 되었고, 저침습화(低侵襲化)가 한층 진전되어, 의료기술을 근본부터 변화시킬 가능성 등도 나오고 있는 것이다. 이러한 시점에서 종래의 로봇산업과는 전적으로 다른 산업분야의 창출을 기대할 수 있다.

둘째, 미소한 영역에서의 물리현상의 특이성이며, 매크로 세계의 매니플레이션과는 다른 현상과 동작을 실현할 수 있고, 앞으로 새로운 로봇기술의 체계가 창출될 가능성도 있다. 예를 들면, 미소세계의 질량(mass)은 거의 무시될 수 있기 때문에, 미소입자의 조작은 하나의 바늘로도 상당히 복잡한 조작이 가능하다. 세포조작 등에서 하나씩 하나씩 조작하는 것에서, 한번에 다수의 세포에 대한 동일조작을 행하는 처리방법을 이용한다면 생산효율을 높인다는 측면에서 바람직하다. 마이크로/나노로봇 기술은 종래의 매크로로봇의 소형화 기술에 의한 마이크로/나노화에 머무르지 않고, 새로운 센싱기술과 액츄에이터 기술개발과 동시에 새로운 관점과 방법으로 시스템화가 요구되는 큰 분야라고 말할 수 있다.

셋째, 마이크로/나노매니플레이션에 미소기기의 이용도 범주에 들어간다면, 예를 들어 마이크로 수리(maintenance) 로봇 등은 기기 그 자체가 가진 경박단소의 효과로 인해 성능의 개선과 에너지의 절감, 대량생산화의 용이함을 가질 수 있어 적용분야와 적용형태의 범위확대가 가능하게 된다.

2.3 나노핸들링 로봇기술의 응용

마이크로/나노매니플레이션 기술은 크게 마이크로/나노매니플레이션 기술 그 자체에 관한 모든 매니플레이션, 협소하고 복잡한 공간과 미소영역에서의 공간이동기술, 대상물의 가공/조립 등 미세 기구(tool)에 관한 기술, 시각 및 힘 등의 미소영역에서 환경정보의 센싱기술, 미소한 센서와 액츄에이터 제작기술, 전자회로를 조합시키고 머신을 구성하는 시스템화 기술, 기관상에 프로세스 공정을 만드는 TAS 기술, 휴먼 인터페이스기술, 통신/에너지기술 등 광범위하다.

마이크로/나노매니플레이션 기술의 특수성을 고려하여 앞으로 관련 기술이 크게 필요하게 되는 분야는 다음과 같다.

- 마이크로 수술 및 마이크로/나노매니플레이션에 의한 세포레벨의 진단치료를 가능하게 하는 첨단의료분야.
- 농축산물의 안정공급과 고품질화를 지향하는 다종의 동식물 핵이식, 또는 생명과학의 연구에 필요한 각종 세포조작 및 신약개발을 포함한 바이오산업.
- 초미소 디바이스와 컴포넌트(Component)에 따라 제작된 초소형 전자회로 및 마이크로 머신 제조기술.
- 초소형 이식로봇과 고정, Sensing 디바이스에서 복잡화된 초소형 분산 모니터링 시스템을 적용하는 방재/방법분야.
- 재해현장 모니터링 및 인체탐사 등의 재해복구 대응분야.

이러한 분야에서 적절한 이용을 도모하기 위해서는 디바이스 및 시스템의 초소형화 기술에 머무르지 않고 시스템 공학적 방법에 기초한 마이크로/나노 영역 고유의 로봇기술개발과 확립이 요구된다.

3. 나노핸들링 로봇기술의 현황

3.1 세포조작기술

일반적으로 세포조작이라고 하는 것은, 축산에 있어서 육종개량과 증식을 위한 배의 절단분리조작과 생명과학에 있어서 Transgenic/KO 마우스를 작성하기 위한 DNA주입, 또는 생식의료에 있어서 현미수정과 착상전 진단 등 광범위하다. 예를 들면 배조작에서 현재 사용되는 기구는 독립현미경, 마이크로 매니플레이터, 인젝터(실린지), 세포융합장치(DC 펄스 발생기와 전극), 압전 구동식 임팩트 매니플레이터, 미소글래스 기구(tool) 등이다. 이것은 당초 연구개발자가 수작업으로 행하여 왔지만, 현재는 산업계에서 제작 상용화되고 있다. 그림 1에서는 소의 수정란 핵이식 조작 예를 제시하고 있다. 대상의 수정란은 대개 120 μ m 정도이다. 좌측부터 (a) 세포막에 구멍을 내고, (b) 가운데의 불필요한 핵을 꺼내어, (c) 세포를 핀셋으로 고정해서 새로운 핵을 주입하고, (d) 마지막으로 전극에서 전압을 가하여 핵을 융합시키는 부분이다.

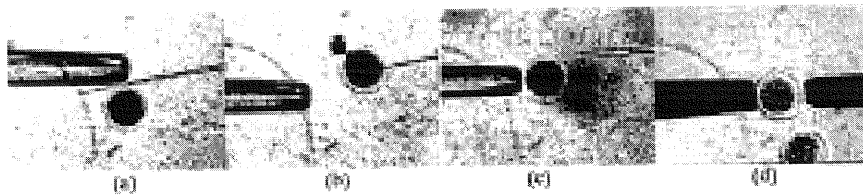


그림.1 핵이식에

이러한 조작은 현재 숙련된 기술자가 수작업으로 행하고 있고, 1회당 조작시간은 5~10분 정도 소요된다. 또한 융합 성공율은 복제(clon) 소 작성의 경우 50~70%, 게다가 이것이 분열해서 배반포가 되고 이것을 체내에 착상시켜 최종적으로 분만 생존에 이르는 확률은 높아야 5% 정도이다. 이러한 현재의 세포조작기술은 고도의 기능을 가진 숙련자만이 가능하고 또한 작성시간이 소요됨과 동시에 그 성공률도 극히 적어 생산효율도 매우 좋지 못하다고 할 수 있다.

3.2 마이크로 수술(surgery)

마이크로 수술(surgery)의 한 예로서 미소혈관의 봉합이 있다. 현재 상황으로서는, 의사가 현미경을 얼굴에 장착하고, 직경 1mm 정도의 혈관을 직경 0.1mm 실을 이용해서 봉합시킨다. 바늘 6개당 봉합하는데에 수십분이 걸리기 때문에 수술전체로서는 수시간이나 이르는 매우 중노동이라 할 수 있다.

복강경 수술에서 이용되는 선단 Tool은 자유도가 복잡한 기구인 만큼 사용후의 청결확보가 어렵고 원칙상 사용후 버리는 것으로 되어 있다. 고가의 기구(tool)을 1회 사용하고 버리기 때문에 의료비 부담증가가 크다는 문제가 있다. 이러한 점에서 저 가격화를 도모하는 제조기술, 시스템화 기술은 중요한 연구과제라고 할 수 있다.

3.3 DNA 및 분자조작기술

DNA의 크기가 2nm 전후이고 길이는 μ m~nm 이상에 이르는 가늘고 긴 형상이며, 또한 형백 등과 같은 생체고분자 등도 크기가 수십, 수백 nm 정도이다. 이러한 DNA, 단백질의 조작을 하기 위해서는 부서지기 쉬운 대상의 취급, 특수한 형상 등을 고려한 방법이 필요하다. 또한 이것들은 통상 현미경 아래 수용액 안에 놓여지므로, 접근 방법도 한정된다.

세포표면에 있는 시알산, 아미노산 등의 해리에 따라 발생하는 세포표면 전하와 외부 전계의 의 상호작용에 의해 세포를 움직이게 할 수 있다. 이를 전기영동(electrophoresis)이라 하며, 증가하는 전계의 강도에 비례하는 이동속도를 발생시킬 수 있다. 예를 들면 적혈구에서는 1V/m의 전계에 대해서 1 μ m/s 정도이다. 전기영동은 기구가 간단하지만, 전기침투에 의한 대류 및 전극의 분극과 전극반응 등이 일어나기 때문에 세포의 정밀한 운동제어가 곤란하다.

한편 모질이 다른 유전율을 가진 입자에 전계를 인가하면, 입자는 정전분극을 일으키고, 분극전하가 유도된다. 이 전하와 외부 전계와의 상호작용을 이용하여 세포에 병진운동(유전영동, dielectrophoresis) 및 회전운동, 정전배향, 변형, 펄체인포메이션, 등의 조작을 이루어지게 할 수 있다. 그림 2는 진행파 전계에 의한 세포조작 예에서 일차원적으로 배열된 전극열에 다상교류를 증가함에 따라 부의 유전영동에 의해 세포를 공간적으로 유지(levitation)함과 동시에 진행파에 의해 유송되는 것이다. 이 그림에서 전극열이 수전측과 진행방향측의 2열로 나누어져 있는 것은, 그 사이의 전극이 없는 부분에서 전계를 약하게 하기 때문이고 세포가 부의 유전영동에 따라 진행되는 것을 이용하여 입자의 「통하는 길」이라 한다.

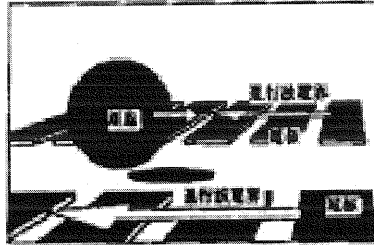


그림.2 진행파 전계에 의한 입자 및 세포의 반송

4. 유망한 적용분야와 system 개발 예

4.1 세포조작의 자동화와 대량처리화

축산물에 있어서 육종개량 등에 필요하게 되는 핵이식 작업의 생산효율을 높이기 위해, 이식작업에 관한 조작의 자동화를 이루었다. 공급된 세포 포착, 포착된 세포의 자세제어, 세포막의 특정위치의 발아, 불필요한 핵의 제거, 새로운 핵의 주입, 융합전극으로의 고정, 융합된 세포의 제거와 배양기로의 반송, 이러한 일련의 작업을 행하기 위한 매니플레이션기술, 관찰계와 화상처리 기술, 미소환경에 있어서 세포의 반송, 대량처리기술개발을 행한다. 이것은 제일단계에서 접촉 매니플레이션기술에 의한 단일세포에 대한 상기작업의 자동화를 지향한다. 다음으로 비접촉 매니플레이션기술과 TAS의 유체 제어 기술 등을 적절하게 조합시켜 다수의 세포를 “마이크로 파렛”로 고정하고 이것을 모두 세포에 조작을 일괄해서 처리하는 방법을 개발한다.

4.2 의료분야

외과외사의 고도의 기능을 이용한 마이크로 Surgery의 부분자율화를 도모함과 동시에, 혈관봉합 등 고도의 판단을 요하지 않은 단순치료의 자동화를 꾀한다. 내시경의 앞부분에 장착된 현미경과 마이크로 핸드에 의해 초기의 악성종양 등을 세포레벨에서 발견 제거하여 치료할 수 있는 선택적 국부미세치료 시스템을 개발한다.

CHIP 상에서 특정조직의 세포 및 혈관 등의 기계적 특성, 생화학특성을 계측하고, 미량의 조직과 체액에 의해 검사, 진단을 할 수 있는 TAS 시스템을 개발한다.

4.3 마이크로 전자회로 및 마이크로머신 조립

광학현미경과 전자현미경 아래서 전자회로와 센서 조립 및 IC 불량부분을 손질한다. 지금까지 Si 프로세서에 의해 메모리 등 대량으로 생산하는 디지털회로의 제작기술은 크게 진보했다. 그러나 스마트센서 주변의 앰프와 처리회로 등의 아날로그 전자회로의 제조기술은 특정 조직(펄프라운 등)에서 밖에 조작할 수 없는 상황에서 만들고 싶지만 만들 수 없게 되어, 최근 20~30년 동안 센서 및 아날로그 회로제조기술의 진보는 없다. 이러한 상황을 타파할 수단으로서 종래의 인간이 200×200mm 정도의 회로소자에 회로소자를 놓고, 이것을 접속하여 여러 가지 전자회로를 1개라도 만들 수 있도록 한다. 전자기기의 진보를 위해서는 이러한 현미경 아래서의 작업은 필요불가결하

다. 또한 IC등의 불량품을 일부 손질한다면 불필요한 폐기물이 줄어든다. 또한 HP의 마이크로 밀러와 대형액정 등 제품에 대한 원료의 비율이 적은 프로세스에서 불량개수를 수정할 수 있다. 마이크로 머신조립에 관해서는 현재 마이크로 가공기술에서 부품 가공을 할 수 있으나, 이것을 시스템에 연결할 때의 조립기술이 충분하지 않기 때문에 마이크로 머신의 기술을 충분히 살리지 못하고 있다.

4.4 분자결합에 의한 결정성장

무기물의 경우는 양자정호(井戸) 레이저 등의 초격자의 작성, 청색LED등을 자유롭게 할 수 있다. 분자의 고정여가 필요하다. 유기물의 경우는 형백질의 합성, 유기기능소자의 제작이 주요 연구주제이다.

5. 분석자 결론

광범위한 자료를 정리하면서 본문의 내용을 충분히 숙지하지 못하고 지나친 부분이 없지 않을 것이다. 본 보고서는 21세기 로봇기술의 새로운 응용분야에 대한 잘 분석하였다고 생각되며, 필자의 전공분야와 관계된 나노핸들링 로봇기술에 대한 부분을 분석해 보았다. 21세기에는 기존의 매크로 로봇을 보다 적극적으로 산업 현장에 도입하는 한편, 로봇 산업의 새로운 패러다임에도 진취적인 자세로 도전해야 할 때이다. 일본 뿐만 아니라 미국, 독일, 스위스 등 선진국을 중심으로 학교와 연구소를 중심으로 나노핸들링 로봇기술에 대한 연구가 정부의 적극적인 지원으로 원천 기반기술부터 응용기술에 이르기까지 분야별로 차근차근 진행되고 있으며 어느정도 가시적인 성과도 나오고 있다. 국내에서도 나노기술, 바이오기술과 연계한 로봇기술 연구가 태동기에 있으며, 점점 관심이 고조되고 있다. 본 분석물에서 다룬 나노핸들링 로봇기술은 로봇산업은 물론 21세기에 나노기술(NT), 바이오기술(BT), 정보기술(IT) 분야의 산업을 근본적으로 업그레이드 시키는 원동력이 될 것이다.