

미세수술용 매니플레이터의 개발을 위한 미세수술 작업 분석

Analysis of Microsurgery Task for developing Microsurgery Manipulator

°송세경* • 김완수** • 권동수* • 조형석*

* 한국과학기술원 기계공학과(Tel: +82-042-869-3082, Fax:+82-042-869-3095)

** 한국과학기술원 자동화및 설계공학과(Tel: +82-02-958-3461, Fax:+82-02-968-1638)

Abstracts Since surgery is usually a difficult task because of physiological tremor, eye strain, hand tremor, contagious and radioactive hazard, it is necessary to develop micro-surgery telerobotic system using improved tools suitable for their specific tasks. Nowadays the growth of interest on microsurgery and medical applications of robotics has been so rapid. But the medical robots are only practical applications of the industrial robots. This paper identifies five general areas of advanced microsurgery based on the current technological background and expertise, and analyzes the motion, tool and accuracy with respect to microsurgery task, and proposes the criteria to evaluate micro-surgical manipulator. The analysis of microsurgery can be helpful to clarify some basic concept and design of micro-surgical manipulators. With these data, we will also propose an efficient in-parallel-platform manipulator having special kinematic structure suitable for microsurgery.

Keywords Microsurgery, Telesurgery, Medical Robot, Parallel Manipulator

1. 서론

80년대 후반부터 의사에게 보다 편리하고 안전한 수술환경을 제공할 수 있는 의료기술에 관한 연구와 수술도구 대신 정밀제어가 가능한 로봇을 활용한 수술작업에 관한 연구가 외과 수술분야에서 활발히 진행되고 있다. 외과 수술은 환자의 안전성, 수술의 신속성과 정밀성, 치료비의 저렴성 및 의사의 편리성을 추구하는 방향으로 발전해오고 있다. 이와함께 의료기술의 발달로 안구수술, 뇌수술, 최소침습수술과 미세혈관수술 같은 미세 수술의 수요가 점차 증가하고 있다. 하지만 기존의 외과수술환경은 협소한 수술실에서 장시간 손운동의 수술작업에서 기인한 육체적 피로때문에 인한 손 떨림과 정신집중 약화 현상이 발생하며, 이는 외과수술의 성공률을 낮추는 주요 문제들로 작용하고 있다. 이런 문제를 해결하기 위한 대안으로 로봇을 활용한 의료 자동화가 외과수술분야에서 활발히 연구되고 있다[1,2,3,4]. 그 중 의사의 동작 지시에 따라 로봇이 수술을 집도하는 원격수술(Telesurgery)은 외과수술분야에 좋은 대안이 되고 있다 [1,2,3].

본 연구는 원격수술에서 의사의 동작 지시에 따라 동작되는 매니플레이터의 개발을 위해 진행되는 선행연구인 미세수술의 작업분석이다. 미세수술용 매니플레이터의 제안을 위해 의료 로봇의 분야를 고찰하고, 그 중 5개의 주요 미세수술의 분야를 선정하여 수술방법, 작업공간, 정밀도와 수술 도구의 동작 등을 분석하고 이를 근거로 미세수술용 매니플레이터의 개발에 필요한 요구사항들(Requirements)을 만들었고, 또한 이 요구사항들을 만족시키는 미세수술용 매니플레이터를 제안하였다.

2. 의료용 로봇과 미세수술

의료용 로봇에 관한 많은 연구가 진행되어 비약적인 발전을 이루고 있으며 광범위한 의료 분야에서 로봇의 활용 방법에

관한 관심과 투자가 이루어 지고 있다. 의료계에서 로봇이 연구 개발되는 분야는 적용대상에 따라 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 수술분야에서 사용되는 수술용 로봇(Surgical Robot), 장애인과 노인같이 육체적 문제를 지니고 있는 사람들을 돕는 로봇(Human_Assistant Robot)과 생체 미케니즘을 연구하는 바이오 로봇(Bio-Robot)이다. 의료 분야에 로봇의 활용과 응용에 대한 개략적인 구별은 다음과 같은 주요 분야로 나누어질 수 있다[9]. 수술용 로봇(Robots for Surgery)은 기존의 수술 방법에 로봇을 활용하는 것으로 단순히 의사의 의술능력을 돕는데 그치는 것이 아니라 수술을 로봇이 집도하는 방향으로 발전하고 있다. 사람을 돕는 로봇(Human_Assistant Robot)은 인간생활의 편리를 도모하거나, 장애인처럼 육체적 어려움을 지닌 사람들의 신체적 장애를 로봇으로 극복하게 하는 재활 로봇(Rehabilitation Robot) 등이 있다. 생체 로봇(Bio-Robot)은 생체를 정확한 시스템으로 모델링 하여 인간의 인체 미케니즘(Bio-Mechanism)의 이해하기 위해 개발된 미래지향적 로봇 연구 분야이다.

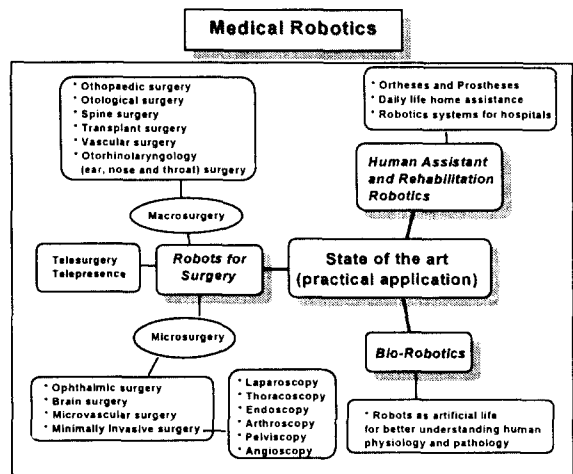


그림 1. 의료용 로봇의 현황

Fig. 1 State of the Art of the Medical Robots

2.1. 원격 수술(Telesurgery, Teleoperation for Surgery)

원격수술은 전화, 인공위성, 원격 화상 지원 시스템 등을 사용하여 지리적으로 떨어진 곳, 예를 들면 전문의가 없는 곳(예, 전쟁터, 우주선, 구급차 안...), 의사의 안전이 필요한 곳(예, 교도소 안, 전염병이나 장시간의 X-ray 촬영) 등에 의학 정보나 의료 지원을 제공하기 위하여 개발된 통합 시스템을 의미한다. 1960년대에 우주 공간 속에서 의료 지원을 하기 위하여 NASA에 의해 원격수술은 시작되었고, 1974년 NASA는 원격진단(Remote Medical Diagnosis)을 위하여 화상장치(Video Requirements)를 사용하였다. 원격수술이 지리적으로 떨어진 곳에 의료지원을 하는 것인 반면에 수술용 원격제어 시스템은 기존 수술실에서 의사의 경험과 로봇의 정밀 작업 수행 능력을 결합한 마스터 슬레이브(Master and Slave Man Machine Interface) 시스템을 의미한다[1,2]. 기존의 집게, 메스, 가위 등보다 원격제어 로봇 시스템을 이용한 미세수술용 매니플레이터의 사용은 손의 피로와 떨림을 줄일 수 있고, 수술 중 잠시 휴식을 취하고 계속하여 작업을 할 수 있고, 고도의 전문성과 숙련성을 요구하는 다양하고 복잡한 수술 과정을 비 숙련의가 쉽게 익힐 수 있는 환경 제공이 가능하다. 또한 손끝으로 환부에서 느끼는 촉감을 슬레이브 매니플레이터에서 힘반영 기능(Force Reflecting)을 통하여 마스터에 전달하여 의사가 직접 수술할 때 느끼는 감각을 만들어 줄 수 있다. 또한 의사의 센티미터 단위의 동작지시를 동작감쇄(Motion Reduction)를 이용하여 미크론 단위의 동작으로 변화하여 더욱 편안하고 정밀한 수술 집도를 구현할 수 있다. 이런 기능을 갖춘 미세수술용 매니플레이터의 사용은 기존의 수술방법에 비해 더 정확하고, 더 적은 절개, 더 적은 피부 손상, 더 빠르고 우수한 치료를 가능하게 할 수 있을 것이다. 수술용 원격제어시스템은 복강경수술을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있으며 실용화를 위한 준비 작업 중에 있다[3].

2.2. 미세 수술(Microsurgery)

미세수술(Microsurgery)이란 거시수술(Macro Surgery)과 기존 수술(Conventional Surgery)과는 달리 인터페이스를 사용하여 동작을 감소시킴으로써 미크론 단위의 정밀도를 요구하는 미세혈관이나 세포조직을 대상으로 하는 수술이다. 그 대표적인 수술들을 수술 부위별로 분류하면 안구수술(Ophthalmic Surgery), 뇌수술(Brain Surgery), 미세혈관수술(Microvascular Surgery), 최소침습수술(Minimally Invasive Surgery)등으로 나누어진다. 이 수술들의 수술 과정을 작업내용, 자유도, 작업공간, 수술도구의 운동형태 등으로 분석하였다.

2.2.1. 최소침습수술(Minimally Invasive, Endoscopic Surgery)

최소침습수술(Minimally Invasive, Endoscopic Surgery)은 의사가 내시경을 이용하여 보면서 인간의 신체 내부 속 환부까지 직접 접근하여 수술을 집도하는 것으로 절개부가 기존의 개복수술보다 매우 적어 환부 이외의 피부 조직을 최소화시킬 수 있으므로 환자의 회복이 빠르고 수술의 성공률도

높다. 다양한 부위에 적용되어 지며, 그 중 신체 부위에 따라 분류하면, 흉부경(胸部鏡, Thoracoscopy), 관절경(關節鏡, Arthroscopy), 골반경(骨盤鏡, Pelviscopy), 혈관경(血管鏡, Angioscopy), 복강경(腹腔鏡, Laparoscopy) 등이 있다.

이 중 가장 대표적인 수술인 복강경수술은 미세수술과 같은 정밀도를 요구하지는 않지만 최근 5년 동안 비약적인 성장을 이루어 2000년경 전체 개복수술의 60 ~ 80%가 복강경 수술로 수행 될 정도로 급부상하고 있는 외과수술 분야이다. 이 수술 과정은 배를 절개하지 않고 5 ~ 10mm의 2 ~ 3개의 구멍을 천공하여 집게(Forceps), 가위(Scissors)와 내시경등을 삽입하여 암이나 손상된 피부 조직을 절개, 제거, 이식하는 수술로 기존의 개복 수술보다 절개부가 매우 적고, 건강한 세포조직의 손상을 최소화 할 수 있어 후유증과 회복이 매우 빨라 의료 비용을 크게 감소시킬 수 있다. H. Russel, Taylor, Janez Funda 등은 힘반향 매니플레이터와 3차원 가상 현실 기술을 이용한 텔레오퍼레이션 기법을 이용하여 수술 집도 의사에게 개복 수술 때와 동일한 감각을 가지고 수술 가능케 하는 텔레로봇 시스템을 연구 개발하였고 동물 실험을 통하여 인체의 적용 가능성을 입증하였다[3]. R. Hurteau 등은 복강경 수술에 있어서 복강경 카메라를 로봇이 보조하는 로봇 카메라맨 시스템(Robot Cameraman System)을 개발하였다[6].

2.2.2. 안구수술(Ophthalmic Surgery)

안구수술은 수술 도구에 의하여 눈이 손상되기 쉽고, 미세한 혈관이나 세부조직을 선별하여 수술의 집도해야 하기 때문에 의사의 손동작의 불안정성 및 부정확성이 의료사고의 주요인인 되고 있다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위해 미크론 단위의 정밀한 포지셔닝(Positioning)이 가능한 로봇의 활용이 적극 연구되고 있다. 최근에는 안구수술에 소극적인 마이크로 로봇의 사용 대신 로봇의 초정밀 작업 수행능력과 의사의 경험을 결합하여 초정밀 제어 기능을 부가한 마스터 슬레이브 로봇(Master-Slave Robot)을 이용한 텔레오퍼레이션에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있으며 망막정맥폐색(Retinal Venous Occlusion) 수술 같은 것은 1993년 K.W. Grace에 의해 6자유도 병렬 매니플레이터를 사용하여 망막 혈관 내의 혈전부에 혈전을 녹이는 항응고제를 주입하는 극 미세 수술이 시도된 예가 있다[10].

2.2.3. 뇌수술(Brain Surgery)

뇌수술은 인간의 생명과 직결되므로 고도의 정밀성과 안정성이 다른 수술보다 우선적으로 보장되어야 하는 수술이다. 이 분야에서 활발한 연구분야는 스테레오택틱 뇌수술(Stereotactic Brain Surgery) 분야이다. 이 수술은 뇌 병변부의 조직 검사를 위한 샘플 채취 목적 및 국소적인 뇌출혈, 뇌종양, 뇌낭종 등의 농양 제거를 위해서 실시되는 수술로 두개골에 조그만 구멍을 천공하여 이를 통하여 수술용 탐침(Micropipette)을 삽입하고 CT(Computer Tomography)나 MRI(Magnetic Resonance Imaging)등의 장비를 통하여 얻어진 정보를 바탕으로 수술한다. 이 수술의 문제점 역시 두개골에 천공한 조그만 구멍을 통하여 시술함으로써 수술 중 수술 집도의가 뇌를 직접 관찰 할 수 없으므로, 수술 전 CT나 MRI 등 영상 진단 장치로부터 얻어진 정보를 바탕으로 미리 수술 방법에 대한 구체적인 계획을 세워야만 하고, 수술 중 수술 집도의의 조그만 실수도 용납치 않는 정밀한 동작이 요구되는

접이라 하겠다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 1988년 Y.S.Kwoh, J.Hou등은 영상 진단 장치와 시술용 로봇을 결합한 시스템을 개발하여 스테레오택틱 뇌 수술에 적용하고자 하는 연구를 하였다.

2.2.4. 미세혈관수술(Microvascular Surgery)

미세혈관수술은 손상된 특정 피부 조직에 영덩이나 신체의 일부를 절개하여 이식하거나, 불의의 사고로 신체의 일부가 잘린 경우 재 접합을 시키거나, 신체 내의 암, 종양과 같은 악성 세포만을 선별 제거하는 미세하고 많은 시간을 요구하는 수술 작업이다. 이 수술은 장시간 수술도구를 사용해야 하기 때문에 의사의 육체적인 피로가 가중되어 집중력이 약해지는 현상이 발생하는데 이로 인한 손 떨림은 미세수술의 부정확성을 만드는 주원인으로 작용하고 있고, 미세혈관을 대상으로 수술이 진행되기 때문에 정밀도가 높고 다양한 수술동작이 가능한 마이크로 매니플레이터의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이와 더불어 효과적으로 손떨림을 억제할 수 있는 다양한 방법들이 연구되었는데 1995년 Johns Hopkins MAD(Microsurgery Advanced Design) 연구실에서는 피에조(Piezoelectric) 액츄에이터를 이용하여 주파수가 대략 8-12Hz이고, 크기는 0.003mm RMS(Root Mean Square) 정도인 손떨림을 방지하기 위한 연구를 진행하여 전체 운동에서 손떨림의 크기를 67%까지 줄일 수 있었다.

2.3. 미세수술 작업 분석

미세수술을 수술부위, 작업내용, 수술도구, 작업영역, 자유도와 수술도구의 운동형태등으로 분석하여 정리하면 Table. 1과 같이 될 수 있다.

표. 1 미세수술환경 분석

Table. 1 Analysis of the Microsurgical Environment

Field Content	Ophthalmic Surgery	Brain Surgery	Minimally Invasive Surgery	Microvascular Surgery
Task	Corneal Graft	Stereotatic Brain	Angioscopy	Microvascular
Tool	Trephine	Microgripper	Microscissors, Microlaparoscopy	Micropipette, Microgripper
D O F	4	5	6	6
Workspace	10-1000 μ m	300-2000 μ m	200-5000 μ m	40-2000 μ m
Motion	Screwing, Cutting	Puncturing, Cutting	Cutting, Pushing and Fitting	Holding, Fitting, Cutting
Accuracy	15-30 μ m	20-40 μ m	30-600 μ m	25-50 μ m

Table. 1을 그림으로 표현한 Fig. 2,3에서 알 수 있듯이 작업영역(Workspace)은 약 10mm 정도, 10 μ m 정도의 정도(Accuracy)가 요구되며, 작업대상으로는 안구, 뇌, 혈관등과 같이 초 정밀 수술이고 작업 영역이 크지 않은 것이 적합하다(Fig. 2). 또한 매니플레이터의 개발은 6자유도로 협소한 장소에서 다양한 수술도구 동작이 가능한 형태로 개발이 요구된다(Fig. 3).

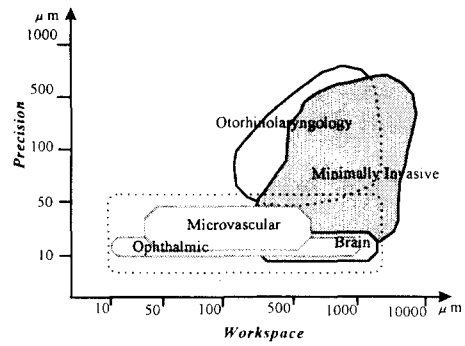


그림 2. 작업공간과 정밀도
Fig. 2 Workspace and Precision

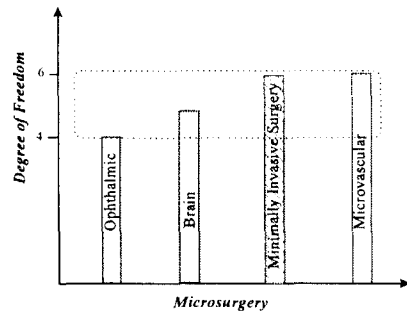


그림 3. 미세수술과 자유도
Fig. 3 Microsurgery and Degree of Freedom

3. 수술도구 동작 분석

외과 수술은 일반 조립공정과 같은 작업들에 비해 수술도구의 다양한 동작을 필요로 한다. 주요 미세수술의 수술도구 운동형태는 Fig. 4와 같이 모델링될 수 있다. 미세수술 작업은 협소한 공간에서 미세 세포조직을 절개, 이식, 이동, 천공, 회전, 집기와 접합 등 정밀하고 다양한 동작으로 이루어지기 때문에 말단장치(수술도구)의 회전동작을 자유롭게 구현할 수 있는 매니플레이터의 개발이 필요하다.

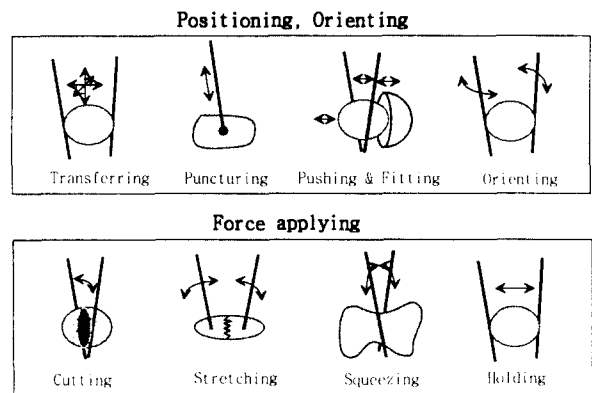


그림 4. 수술 도구 운동 모델링
Fig. 4 Modeling of Tool Motion

미세수술 작업은 고정된 위치에서 수술도구의 Euler Angle α, β, γ 방향을 손목과 같이 자유자재로 회전운동을 시키야 하므로 기존의 직렬 형태의 로봇으로는 미크론 단위의

정밀도를 지니며 회전운동을 만들어 내기 어렵다. 따라서 협소한 장소에서 자유자재한 동작 구현을 위해 구조 강성이 높고, 국소영역에서 6자유도 동작이 가능한 병렬 구조가 미세수술용 매니플레이터로 적합하다.

4. 미세수술용 병렬 매니플레이터

외과 수술용 매니플레이터는 사람을 대상으로 작업이 이루어지기 때문에 안정성이 보장되어야 한다. 환부의 수술을 담당하는 수술도구의 자유자재한 동작 구현을 위해 6 자유도가 필요하며 매니플레이터의 하드웨어 크기가 작아야 한다. 또한 피, 이물질, 물 등과 같은 수술 환경에 오염되지 않아야 하고, 말단부의 수술도구 동작형태를 직관적 관측할 수 있는 Hand-Eye Coordination이 가능하여 제어의 용이성과 의사의 사용 편리성을 도모할 수 있어야 한다. 이와함께 매니플레이터를 사용하여 얻어지는 장점들이 기존의 수술 방법보다 우수함이 입증되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 위의 요구사항들을 만족시키는 Fig. 5와 같은 6자유도 병렬 매니플레이터를 제안하였다. 이 병렬 매니플레이터는 상판과 하판사이에 6개의 선형링크로 연결되어 있으며 상판 원추(Moving Cone)를 세 개의 내부링크가 지지하는 모래시계형 구조이다. 제안된 미세수술용 6자유도 병렬 매니플레이터의 주요 특징은 Stewart Platform과는 달리 상판에 3개의 볼조인트만 연결되어 있고, 환부까지 병진 운동하고 나서, 내부 링크 3개를 고정하고 외부링크 3개만으로 상판의 회전운동이 가능하여 병진운동(Positioning)후에 회전운동(Orienting)하는 병진, 회전 분리 운동이 가능하다. 다른 병렬 구조보다 상판의 Euler Angle 회전영역이 넓어서 미세수술처럼 다양하고 자유자재한 동작을 필요로 하는 작업에 적합할 것이다.

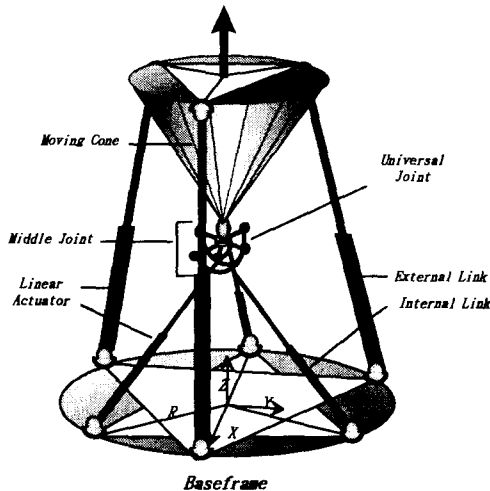


그림 5. 미세수술용 6자유도 병렬 매니플레이터
Fig. 5 6 D.O.F. Parallel Manipulator for Microsurgery

5. 결론

의료용 로봇의 분야는 사람을 돕는 로봇(Human-Assistant Robot), 수술용 로봇(Surgical Robot), 바이오 로봇(Bio Robot) 등으로 분류되고 있고, 이것들의 목적은 인간을 돕거나, 의사의 기능을 보조하거나 인체를 연구하기 위해서 사용되고

있다. 의료용 로봇중 미세수술은 안구수술(Ophthalmic Surgery), 뇌수술(Brain Surgery), 미세혈관수술(Microvascular Surgery), 최소침습수술(Minimally Invasive Surgery) 등이 주요 연구 대상이고, 이 수술들의 작업분석, 수술동작 분석을 통하여 외과 미세수술용 매니플레이터에 필요한 특성들을 알아 보고, 병진운동 후에 회전운동을 3개의 외부 선형링크의 구동만으로 구현할 수 있는 미세수술용 6자유도 병렬 매니플레이터를 제안하였다. 제안된 구조의 해석과 구현을 위한 연구를 진행 중에 있다.

본 연구는 보건복지부(계정번호 HMP-96-E-5-1015)와 한국과학기술원(계정번호 NN23110)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] S.Lee and H.S.Lee, "An Advanced Teleoperator Control System: Design and Evaluation", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 859-864, 1992.
- [2] P.S.Schenker, H.Das, T.Ohm, "Development of a Master-Slave Manipulator for Dexterity-Enhanced Microsurgery", in *Telemanipulator and Telepresence Technologies, SPIE Proc. 2351*, Boston, MA October 1994.
- [3] R.H.Taylor, J.Funda, B.Eldridge et. al, "A Telerobotic Assistant for Laparoscopic Surgery", *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, May/June pp. 279-288, 1995.
- [4] P.S.Green, J.W.Hill, J.F.Jensen, A.Shah, "Telepresence Surgery", *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, May/June pp. 324-329, 1995.
- [5] R.F. Young, "Application of Robotics to Stereotactic Neurosurgery", *Neurosurgical Research*: 9: 123-128, 1987.
- [6] R. Hurteau, S.Desanits, E. Begin and M.Gagnier, "Laparoscopic Surgery Assisted by a Robotic Cameraman: Concept and Experimental Results", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2286-2289, Sandiego, May 8-13, 1994.
- [7] C.W.Burckhardt, P.Flury, D.Glauser, "Stereotactic Brain Surgery", *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, May/June pp. 314-317, 1995.
- [8] Y.S. Kwok, J. Hou, E. Jonkheere, "A Robot with Improved Absolute Positioning Accuracy for CT Guided stereotactic Brain Surgery", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*: 5(2): 1988.
- [9] P.Dario, E.Guglielmelli, B.Allotta, M.C.Vamoza "Robotics for Medical Applications", *IEEE Robot and Automation Magazine*, pp.44-56 1996.
- [10] K.W.Grace, J.E.Golgate, M.R.Glucksberg, "A Six Degree of Freedom Micro-manipulator for Ophthalmic Surgery". *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 630-635, 1993.
- [11] T.Arai, R.Stoughton, "Micro hand module using parallel link mechanism", *Proc. of the Japan U.S.A 1992*.
- [12] Jeff.Wendlandt, S.Shankar.Sastry, "Design and Control of a Simplified Stewart Platform for Endoscopy", *Proc.of IEEE Int. Conference on Decision and Control*, 1994.