

차세대 척추수술 로봇 기술의 현황과 전망

이종원·정완균 (포항공과대학교)

I. 서론

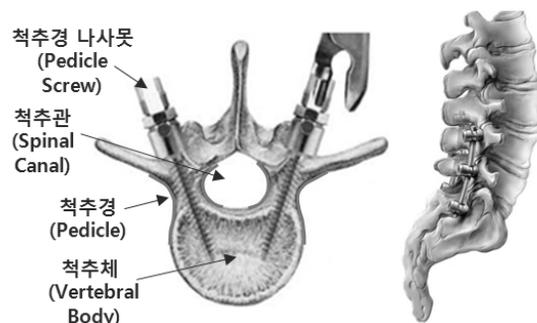
산업계 전반에 자동화 시스템으로 널리 퍼져 있는 산업용 로봇과 달리, 의료/수술로봇은 로봇의 의료목적적 적용이 1985년에 처음 이루어졌을 정도로 아직까지 그 응용범위 및 적용 예가 제한적이다. 하지만 최근 십 년 동안 의료/로봇 수술 기술은 큰 진보를 이루어왔으며, 현재까지 신경외과, 정형외과, 비뇨기과 등의 다양한 수술 분야에서 현실에 활발히 적용되고 있다. 대표적인 복강경수술 로봇의 경우 현재 우리나라의 인구 100명당 수술로봇 보유 대수는 전세계적으로 미국, 이탈리아에 이어 세 번째로 많으며, 이를 이용한 시술 회수는 연간 3천 건을 넘는 것으로 보고되고 있다. 이는 로봇수술이 가지는 높은 수준의 수술 정밀성, 수술 안전성, 최소침습 수술 지원을 통한 환자의 빠른 회복속도 등의 장점 때문으로, 로봇을 이용한 시술은 향후 더욱 다양한 수술분야에서 급속하게 증가될 것으로 예상된다.

의료/수술 로봇은 로봇의 동작영역 내에서 환자와 상호작용하며 동시에 안전한 시술을 보장할 수 있어야 한다. 산업용 로봇은 로봇으로부터 사람을 멀리 떨어뜨려 놓는 등의 안전성 측면에서 사람에게 위해가 없도록 사전에 충분히 대비할 수 있지만, 의료/수술 로봇은 시술이 이루어지는 모든 프로세스에서 안전성을 고려하여야 한다. 때문에 의료/수술 로봇은 일반적인 로봇 적용분야 보다도 더욱 높은 수준의 안전성을 요구로 하며, 이것은 로봇의 의료/수술 분야로의 현실적용 시 진입장벽으로 작용된다. 현재까지 전세계 다수의 연구그룹에서 기존 수술의 로봇적용을 위한 많은 안전성 확보 연구를 진행하고 있으며, 이에 대한 요소기술로 의료영상처리, 시스템 간 정합방법 개선, 새로운 센서, 제어기, 하드웨어 플랫폼 개발 등의 다양한 연구가 수행 중이다.

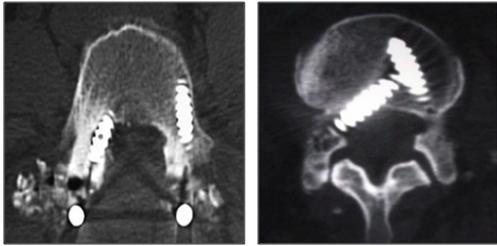
본 고는 다양한 수술 분야 가운데에서도 극도의 정밀성이 요구되는 신경외과의 척추융합 수술의 안전성 확보를 위해 개발되고 있는 척추융합 수술보조로봇 시스템의 현황과 그 전망에 대해 알아보고자 한다. 본 고의 구성은 제 II절에서는 신경외과의 척추융합 수술의 개요에 대해 알아보고, 제 III절에서 수술 안전성을 극복하기 위한 수술보조로봇 시스템의 기술동향을, 그리고 마지막으로 제 IV절에서 향후 전망에 대해 살펴본다.

II. 척추융합 수술 개요

척추 융합 수술(spinal fusion surgery)의 목적은 <그림 1>과 같이 질환이 있는 척추 뼈 양단에 척추경 나사못(pedicle screw)을 삽입하여 이들을 함께 고정 시킴으로써 척추 간 비이상적인 움직임을 방지하여 이로 발생한 통증을 제거하는 것에 있다. 비 수술 치료법으로 치료하기 힘든 증상이 심한 환자들에게 주로 시술되며, 추간판 탈출증, 척추 골절, 요추관 협착증, 척추 탈위증 등의 척추 질환 치료에 효과적으로



<그림 1> 척추융합 수술을 이용하여 고정된 척추



〈그림 2〉 척추융합 수술 실패로 인한 척추경 파괴(pedicle breach) CT 영상

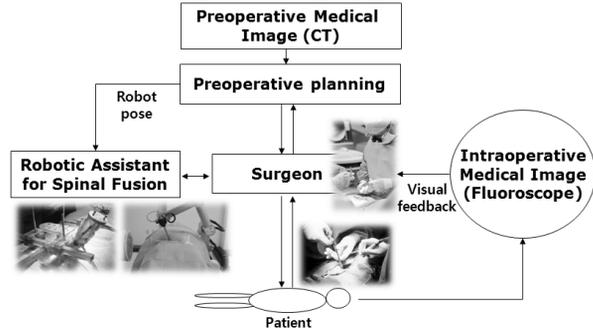
사용된다. 척추 융합 수술은 다른 척추 수술 방법들과 비교하여 양호한 수술 예후, 우월한 생체역학적 특성, 여러 질환에 공통적으로 사용될 수 있는 수술법이라는 점에서 장점을 가지어 다양한 척추 질환에 시술되고 있다.

하지만 시술 도중 요추 기준 4.5~8.0mm의 외경을 갖는 척추경 나사못이 약 6.0~10.0mm 내경을 갖는 척추 내 척추경 영역 내에 안전하게 삽입되어야 한다. 다양한 임상실험을 통하여 흉추 및 요추의 척추 융합 수술 시 필요로 되는 수술 정밀성은 약 3.8mm 이내라는 것은 실험적으로 증명되었다^[1]. 이와 같은 매우 작은 오차의 여유만이 척추 융합 수술 시 허용되기 때문에, 의사는 극도로 주의를 기울이며 시술을 진행하여야 한다. 시술 중 의사의 실수로 인해 〈그림 2〉와 같이 나사못이 척추경 내부에서 벗어나는 척추경 파괴(pedicle breach) 및 척수 손상은 척수 신경에 큰 부작용을 남길 수 있으며, 환자에게 심각한 결과를 가져온다. 실제로 약 10~15% 정도의 환자의 경우에 수술 계획된 위치에서 벗어난 지점에 척추경 나사못이 위치하게 되며, 이 가운데 반 정도가 환자에게 심각한 후유증을 남긴다는 것이 임상 결과 보고 되었다^[2].

Ⅲ. 척추융합 로봇 수술의 기술 현황

상기 척추융합 수술의 위험성을 해결하고 수술 안전성을 제고하기 위하여, 최근까지 척추경 나사못 삽입 위치 보조를 위한 많은 요소기술의 연구들이 진행되어 왔다. 척추융합 수술 지원을 위한 의료영상처리기술, 수술계획시스템 기술, 수술보조로봇 플랫폼 기술이 그 예이며, 이들 요소 기술은 하나의 척추융합 수술보조로봇 시스템으로 통합된다.

〈그림 3〉에는 수술보조로봇 시스템을 활용한 진보된 척추 융합 수술 프로세스가 나타나있다. 의사는 환자의 수술 전 의료영상에 기반하여, 수술 전 계획을 수행한다. 척추경 나사못을 삽입하여야 하는 위치 및 방향, 사용해야 하는 척추경 나사못의 직경과 길이가 결정되며 결정된 삽입 위치 및 방향은 수술보조로봇 플랫폼에 전달되어 척추경 나사못 삽입 작업을 위해 필요로 되는 일련의 과정동안 정밀하게 삽입 위치를 유



〈그림 3〉 수술보조로봇 시스템을 이용한 척추융합 수술 프로세스

지하며 가이드가 가능하다. 의사는 로봇 시스템의 도움을 받아 시술을 진행하며, 수술 중 방사선 투시기(fluoroscope)와 같은 영상장비를 이용하여 척추경 나사못의 위치를 모니터링하게 된다. 척추융합 수술보조로봇 시스템을 구성하는 요소 기술들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 의료영상처리

의료영상처리는 다양한 의료영상을 이용하여 환자의 수술에 도움이 될 수 있도록 ROI (region of interest)의 추출(segmentation), 추적(tracking) 등을 수행하는 기술 및 과정을 뜻한다. 척추융합 수술을 위한 의료영상처리는 환자의 의료영상에서 척추경 나사못이 위치하는, 수술 안전성과 가장 밀접한 척추경 영역을 추출하는 기술이 대표적이다. 본 기술은 주로 환자의 CT(computed tomography) 영상에 기반하며, 추출된 정보는 이후 수술 계획이나 수술 네비게이션 단계에서 유용한 정보로 사용될 수 있다.

척추경 영역 추출 기술의 주된 이슈는 추출 과정의 문제요소를 극복하고, 척추융합 수술이 필요로 하는 정밀성 이내의 척추경 모델을 획득하는 것이다. 추출과정의 문제요소는 CT 영상 간 ROI의 intensity 변이, 척추번호에 따른 형상 변이, 환자의 골다공증 증상, 척추 뼈의 급한 굴곡, 환자 간 형상 변이 등이 있다. 본 기술은 미국의 Texas Univ.와 한국의



〈그림 4〉 추출된 요추의 척추경 모습 (요추1번~5번)

POSTECH, 한양대학교에 의해 주로 개발되어 왔으며, 현재 까지 개발된 척추경 영역 추출 기술의 최고 수준은 정밀성 (accuracy) 측면에서 실제 척추경 위치 대비 약 0.14mm의 평균 오차를 가지며, 반복 정밀성(precision)은 총 척추경 부피 대비 변화율의 크기가 0.5% 미만의 수준으로 보고되었다^[3]. <그림 4>는 추출된 요추의 척추경의 모습으로 붉게 표시된 부분이 척추경 영역이 된다.

2. 수술계획시스템

수술계획기술은 수술 전(preoperative) 단계에서 수술 단계 및 절차를 미리 확정하기 위해 수술 방법을 선 시각화(pre-visualization)하는 기술이다. 시각화를 통해 수술 과정을 한눈에 보여줄 수 있으며, 이 정보는 수술 중 네비게이션 시스템과 연동하여 시술의 정확성을 의사로하여금 모니터링 할 수 있게 해준다. 척추융합 수술 시의 수술계획시스템은 일차적으로 환자의 의료영상 데이터에 기반하여 척추경 영역 내를 안전하게 통과하는 척추경 나사못의 삼차원 직선 경로를 결정하고, 척추경 나사못의 직경과 길이를 선정하는 기능을 수행하도록 도와준다.

현재까지 개발된 대부분의 척추융합 수술 지원을 위한 수술계획시스템은 다양한 영상 modality, 각 의료영상 modality 당 다양한 각도의 view를 의사에게 제공하고, 의사에게서 척추경 나사못의 삽입에 필요한 시작점과 목표점을 입력받아 이를 의료영상에 시각화하는 수동 수술계획시스템이다. 현재 까지 이스라엘 Mazor Surgical Technologies 사의 SpineAssist 수술계획 시스템^[4] 및 한양대학교의 Hexaview 수술계획 시스템^[5]이 이러한 수동 수술계획 시스템의 대표적인 예이며, <그림 5>는 한양대학교의 척추융합 수술 보조 로봇에 적용되어 있는 Hexaview 수술계획 시스템의 모습을 나타낸다. 수술 전 단계에서 획득한 CT 영상과 수술 중 획득한 방사선 투시기(fluoroscope) 영상을 다양한 각도에서 의사에게 충실히

제공하며, 이를 기반으로 의사가 척추융합 수술을 위한 수술 계획을 더욱 쉽고 편리하게 수행할 수 있도록 지원한다.

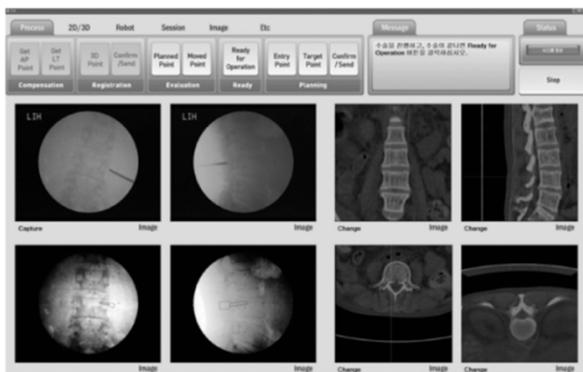
하지만 이러한 장점에도 불구하고, 수동 수술 계획 시스템은 척추경 영역이 나사못 삽입 축 기준 비대칭적인 구조를 가지고 있고, 그 축이 의사에게 제공되는 CT영상의 axial, coronal, sagittal 단면과 직교하지 않기 때문에, 의사에게 제공되는 영상마다 척추경의 폭에 차이가 생기는 한계점을 지닌다. 따라서 수동 수술계획 시스템을 통해 결정되는 수술 경로에 항상 의사마다의 휴먼 에러(human error)가 존재하게 되며, 이 휴먼 에러로 인하여 척추융합 수술에 필요한 3.8mm 이내의 수술 정밀성 중 평균적으로 1.6mm 이상을 수술 계획 단계에서 잃는 것으로 보고되었다.

이를 보완하기 위해서 최근 환자의 CT영상 기반 정밀 삼차원 척추경 모델을 이용하여 수술 안전성 관점에서 최적화된 나사못 삽입 경로 및 나사못 모델 선정을 자동 생성, 의사에게 제시해주는 최적 수술계획 시스템도 개발되었다^[6]. 이는 척추융합 수술지원 수술계획 시스템 기능 및 성능의 최고 수준으로 수동 수술계획 시스템 대비 수술계획 정확성 측면에서 1.67mm의 여유를 추가 확보하고, 수술 계획 소요시간은 45.7% 감소, 의사가 체감하는 유용성 측면에서는 37.5% 증가한 결과를 가져오는 것으로 보고되었다.

3. 수술보조로봇 플랫폼

수술보조로봇은 수술 과정에서 의사가 행하기 어려운 시술을 로봇의 정밀 제어를 통해 해결한다. 최종적으로 수술의 안전성 및 편의성 제고를 목적으로 하며 이는 척추융합 수술 지원 수술보조로봇 플랫폼에도 동일하게 적용된다.

척추융합 수술은 피부절개, 수술 공간 확보, 척추 외피(cortical layer) 제거, 나사못 삽입, 나사못 고정, 봉합의 순서로 진행되는데, 척추융합 수술에서의 수술보조로봇은 상위의 과정에서 발생할 수 있는 수술 오차의 원인을 줄여 척추경 파



<그림 5> 척추융합 수술 지원을 위한 수술계획 시스템 (Hexaview)



<그림 6> 삽입 위치 지도가 가능한 수술 보조 로봇 SpineAssist

과나 척추 손상을 예방하기 위하여 사용된다. 기존 의사의 힘만으로 진행되는 척추융합 수술의 안전성은 수술 중 의사의 나사못 삽입 위치 고정 능력이 시술이 요구하는 정밀성과 비교하여 현저히 낮기 때문에 발생한다. 이는 로봇의 정밀제어의 장점을 통해 극복할 수 있으며, 현재까지 세계 여러 연구기관에서 다양한 로봇 시스템들을 개발하여 왔다. 이 수술보조로봇 시스템들을 그들이 가지는 기능적 측면에서 분류하여 보면 아래와 같다.

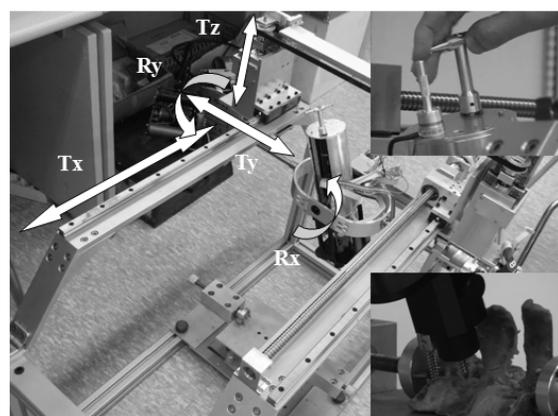
- 삽입 위치 보조(insertion pose guidance): 피부 절개 과정에서 척추경 나사못 삽입 과정까지 로봇 매니플레이터를 시술이 필요한 위치에 고정시켜 로봇 매니플레이터가 가이드하는 위치와 방향으로 k-wire, 다이얼레이터(dilator), 나사못을 정밀하게 삽입할 수 있도록 한다. 로봇 매니플레이터는 환자의 외부에서 삽입 위치와 방향만 제시할 뿐 직접 수술에 관여하지는 않고, 시술은 모두 의사에 의해서 진행된다. Johns Hopkins Univ.의 RCM-PAKY needle 모듈, Mazor Surgical Technologies사의 SpineAssist^[4], 한양대의 SpineBot 시스템^[5]이 삽입 위치 보조 로봇의 대표적인 예이다.
- 삽입 위치 보조 +척추 외피 제거: 상기 삽입 위치 보조 기능에 척추 외부를 감싸고 있는 단단한 외피(cortical layer)를 제거하는 기능을 포함한다. 기존의 척추융합 수술에서는 망치와 송곳을 이용하여 나사못이 삽입되는 시작위치의 척추 외피를 제거하고 나사못을 삽입한 반면, 본 기능을 가지고 있는 로봇 매니플레이터는 정해진 위치에 고속드릴을 이용하여 깔끔하게 척추 외피를 제거하는 동시에 정밀한 나사못 삽입을 위한 나사못의 초기 위치를 설정할 수 있도록 하였다. DLR사의 hand-on-robot^[7]이나 Padua Univ.의 RIME 모듈이 척추 외피



〈그림 7〉 척추 외피 제거가 가능한 수술 보조 로봇 Hand-on-Robot

제거 기능을 포함하고 있는 수술보조로봇 시스템의 대표적인 예이다. 이들은 의사와의 협업제어 및 원격제어를 통해서 구동된다.

- 삽입 위치 보조 + 척추 외피 제거 + 척추경 나사못 삽입: 삽입 위치 보조, 고속드릴을 이용한 척추 외피 제거와 동시에 의사의 조작 정보를 받아 로봇이 나사못 삽입을 직접 진행하는 휴먼가이드 로봇수술 기능을 포함한다. 앞서 설명했던 두 가지 형태의 로봇 매니플레이터들과 비교하여 로봇이 제공하는 기능적인 측면에서 우위를 보이며, 앞선 경우들에서 발생할 수 있는 나사못의 loosening 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 장점을 지닌다. Loosening은 단단한 척추 뼈에 나사못을 삽입하는 과정에서 의사가 작용하는 작용 힘(외력)으로 인하여 나사못의 축과 삽입방향이 일치하지 않게 되는 경우, 나사못과 척추 뼈 사이에 소성 변형이 오게 되어 둘 사이가 들뜨는 현상을 일컫는다. Loosening이 발생한 구간은 시간이 지나면서 그 간격이 커지고 최종적으로 척추 뼈로부터 나사못이 탈출되는 상황을 야기하여 재수술을 요하게 된다. 앞선 두 가지 로봇 매니플레이터들과 달리 나사못 삽입 기능을 로봇이 진행하게 된다면, 나사못 삽입 과정에서 발생하는 의사를 통해 전달되는 불필요한 외력이 나사못에 가해지지 않기 때문에 loosening을 최소화하며 척추경 나사못 삽입이 가능하게 된다. 대표적인 예로 POSTECH에서 개발된 BiTESS-II 와 CoRA 시스템^[8]이 척추경 나사못 삽입을 지원하는 로봇 플랫폼이다. 상기 시스템들은 나사못 삽입 시 수술 도구를 통해 의사에게 전달되는 촉감정보(삽입 깊이, 위치정보 내재)를 실재감 있게 생성하여 의사의 조작부로 전달시키는 햅틱 기능을 포함하고 있어, 로봇을 이용한 척추융합 수술의 안전성 제고에 큰 역할을 수행한다.



〈그림 8〉 휴먼가이드 나사못 삽입 작업 및 수술촉감 랜더링을 지원하는 수술로봇 CoRA

IV. 향후 척추융합 로봇수술 기술

현재까지의 척추융합 수술 분야의 수술보조로봇 시스템들은 대부분 의사의 나사못 삽입 위치 고정능력 보안을 통한 수술 정밀성 향상을 목표로 개발되었다. 이 결과로 다양한 임상 실험에서 기존 환부를 크게 절제하고 진행했던 open 수술기법과 비교하여 로봇을 이용한 최소침습 수술의 경우에도 수술 정밀성이 약 94%의 확률로 수술 계획 대비 1.5mm 이내로 들어오는 결과들이 발표되었다.

향후의 척추융합 수술 분야의 연구는 수술 안전성을 더욱 끌어올리는데 초점이 맞추어질 것이다. 이는 현재까지 개발된 기술에도 불구하고, 여전히 수술 자체가 요구하는 수술 정밀성의 수준이 높기 때문이다. 현재까지도 수술 중 의사가 가하는 작용 힘으로 인한 로봇 자세 오차, CT/fluoroscope 영상 왜곡, 로봇 부착 시의 자세 오차, 네비게이션 및 tracking 시스템 사용으로 인한 시스템 간 정합(registration) 오차 등 척추융합 수술 지원을 위한 수술보조로봇의 성능을 방해하는 여러 가지 요소들이 존재한다. 각 분야에 걸쳐 이를 극복하기 위한 연구가 지속된다면, 척추융합 수술과 같이 매우 작은 오차의 여유만 허용하는 위험한 수술에서도 수술보조로봇 시스템을 이용한 시술이 치료의 표준으로 자리잡힐 날도 멀지 않았다.

참고문헌

- [1] Y. R. Rampersaud, D. A. Simon, and K. T. Foley, "Accuracy requirements for image guided spinal pedicle screw placement," *Spine*, Vol.26, pp.352-359, 2001.
- [2] W. H. Castro, H. Halm, J. Jerosch, J. Malms, J. Steinbeck, and S. Blasius, "Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae," *Spine*, Vol.21, pp.1320-1324, 1996.
- [3] J. Lee, S. Kim, Y. S. Kim, and W. K. Chung, "Automated segmentation of the lumbar pedicle in CT images for spinal fusion surgery," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.58, No.7, pp.2051-2063, 2011.
- [4] D. Togawa, M. M. Kayanja, M. K. Reinhardt, M. Shoham, A. Balter, A. Friedlander, N. Knoller, E. C. Benzel, and I. H. Lieberman, "Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: part 2- Evaluation of system accuracy," *Neurosurgery*, Vol.60, pp.129-139, 2007.
- [5] S. Kim, J. Chung, B. J. Yi, and Y. S. Kim, "An assistive image-guided surgical robot system using O-arm fluoroscopy for pedicle screw insertion: preliminary and cadaveric study," *Neurosurgery*, Vol.67, pp.1757-1767, 2010.
- [6] J. Lee, S. Kim, Y. S. Kim, and W. K. Chung, "Automated Surgical Planning and Evaluation Algorithm for Spinal Fusion Surgery with Three-Dimensional Pedicle Model," In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.2524-2531, San-Francisco, USA, 2011.
- [7] T. Ortmaier, H. Weiss, S. Dobeles, U. Schreiber, "Experiments in robot-assisted navigated drilling and milling of bones for pedicle screw placement," *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, Vol. 2, pp.350-363, 2006.
- [8] J. Lee, I. Hwang, K. Kim, S. Choi, W. K. Chung, and Y. S. Kim, "Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery," *Industrial Robot: An International Journal*, Vol.36, pp.60-72, 2009.



이 종 원

2005년 02월 POSTECH 기계공학 학사.
 2007년 02월 POSTECH 기계공학 석사.
 2007년 03월- 현재 POSTECH 기계공학 박사과정.
 <관심분야> Medical Robotics, Medical Image Processing,
 Surgical Planning, Haptics



정 완 균

1981년 02월 서울대학교 기계설계학과 학사.
 1983년 02월 한국과학기술원 기계공학 석사.
 1987년 02월 한국과학기술원 로봇공학 박사.
 1987년~1988년 포항공과대학교 기계공학과 객원조교수.
 1988년~1989년 Carnegie Mellon University, Robotics Institute 교환교수.
 1989년~1993년 포항공과대학교 기계공학과 조교수.
 1993년~2000년 포항공과대학교 기계공학과 부교수.
 1995년~1996년 U.C. Berkeley 방문학자.
 2000년~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수.
 <관심분야> SLAM, Navigation, Underwater Robots, Medical Robotics, Minimally Invasive Surgery, Robust Controller