

전립선 암 진단 및 치료를 위한 로봇기술 응용 현황

본 논문에서는 지금까지 이루어진 전립선 암 진단 및 치료를 위한 로봇기술 적용 사례 관련 연구들을 조사하여 체계적인 분류 및 분석 작업을 수행함으로써 현재 기술 동향을 파악하고, 앞으로 나아갈 연구 방향을 제시하고자 한다.

■ 안범모, 박기한, 이효상, 김정
(KAIST 기계공학과)

I. 서론

전립선 암은 서구의 남성에게 가장 많이 발병하는 암으로, 2008년도 미국에서 발병된 환자는 약 186,320명에 이르며, 이 중 사망한 환자는 28,660명으로 사망률이 두 번째로 높은 암 질환이다 [1]. 국내 전립선 암 발병률 역시 급격히 증가하여 지난 20여 년간 약 13배 가량 증가했다 [2]. 초기 암일 경우에는 특별한 증상이 없기 때문에 정확한 진단이 힘들며, 전립선 암의 경우 증기 또는 말기 암인 경우 발기불능, 혈뇨, 통증 등의 증상이 나타나지만 이때는 치료를 해도 완치가 힘든 경우가 많다. 미국 암 학회에서는 전립선 암을 조기에 발견하고 신속한 치료가 이루어질 경우 환자의 5년간 생존율이 거의 100%에 이른다고 보고했다 [1]. 이 때문에 50세 이후 모든 남성에게 2년에 한번씩 1차적 진단을 받을 것을 권장하며 가족 중에 병력이 있는 경우는 40대부터 시행 받도록 하고 있다 [3]. 하지만 아직 국내/외 연구 결과에 따르면 전립선 암을 정확하게 진단하기 어렵고, 치료 시 사용되는 시술 장치 및 방법의 한계점 등으로 인해 많은 부작용이 발생할 수 있다고 보고되고 있다. 따라서 이를 극복하기 위해 국내/외 여러 연구팀에서 정밀 측정, 최적설계 및 제작, 제어 기술 등 다양한 공학적 혁신 기술을 적용하여 정확하며 객관적인 진단 및 치료법을 개발하고 있으나 아직 체계적이고 완성도

높은 기술과 이론이 확립되지 않은 상태이다.

본 논문에서는 지금까지 이루어진 전립선 암 진단 및 치료를 위한 로봇기술 적용 사례 관련 연구들을 조사하여 체계적인 분류 및 분석 작업을 수행함으로써 현재 기술 동향을 파악하고, 앞으로 나아갈 연구 방향을 제시하고자 한다.

II. 연구배경

전립선 암 진단 및 치료는 그림 1과 같은 과정으로 이루어진다. 현재 진단법이 표준화 되지 않았으나, 일반적으로 직장수지검사와 혈청 전립선특이항원검사가 시행된다 [4]. 직장수지검사란 의사의 손가락을 직장 안으로 삽입하여 전립선 조직을 만져 봄으로써 암 조직의 유무를 판단하는 진단 방법으로, 전립선 암 조직이 정상 조직에 비해 딱딱하며, 주로 장기의 가장자리 부분에서 암 조직이 발생하는 (약 80%) 특성을 이용한 것이다 [5]. 이 방법은 간편하면서 위험성이 낮고 비용이 적게 드는 장점이 있지만, 검사자의 주관적인 판단 기준에 의해 검사 결과가 도출되기 때문에 정확도와 객관성이 상당히 떨어진다. 혈청 전립선특이항원검사는 전립선에 암 조직이나 염증이 발생하게 되면 항원 수치가 급격히 증가하는 특성을 통해 전립선 암 진단을 하는 방법이다. 이 검사의 도입은 전립선 암 진단율을 높였으나 도입

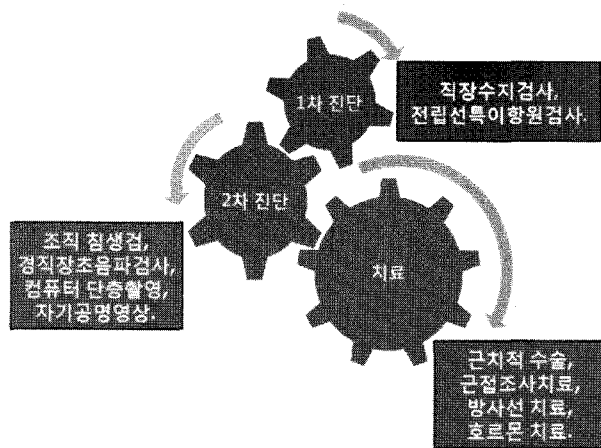


그림 1. 전립선 암 진단법 및 치료법.

후 조기진단에 의한 전립선 암 사망률 감소에 미치는 영향은 확인되지 않았으며, 조직 검사 시행을 위해 제공되는 전립선특이항원값 기준치 검증이 완벽히 이루어 지지 않았다. 1차 진단법을 통해 이상이 발견되면 보다 정밀한 진단을 위해 침생검 또는 다양한 영상 진단(경직장 초음파, 컴퓨터 단층촬영 (CT), 자기공명영상(MRI))을 수행하게 된다. 경직장 초음파검사는 전립선의 병변을 발견하거나, 조직 침생검 시 영상 정보로 사용되는데 암의 진단에 있어서 특이도와 양성예측도가 낮은 단점이 있다. 따라서 주로 컴퓨터 단층촬영이나 자기공명영상을 통한 진단이 많이 사용되고 있지만, 비용이 많이 들기 때문에 초기 암 진단에 적용하기는 힘들다. 침생검은 초음파 영상 유도 하에 항문을 통해 초음파 기구를 삽입하고 바늘을 조직에 삽입해 소량의 조직을 얻는 방법이다. 하지만 초음파 유도 침생검을 통한 전립선 암 진단 확률이 낮으며, 정밀도 또한 낮기 때문에 과도한 횡수의 침생검이 수행되어 환자에게 일시적인 통증과 혈뇨 등의 합병증을 유발하고, 정액에 피가 섞여 나오거나 직장에 출혈이 있을 수 있으며 심각한 경우에는 패혈증이 발생하기도 한다. 이러한 한계점에도 불구하고 위의 방법들이 전립선 암 진단을 위해 계속해서 사용되고 있기 때문에, 한계점을 극복하는 새로운 형태의 진단법 개발이 필요하다.

전립선 암의 치료법은 환자의 나이와 건강상태 및 병기와 종양의 분화도 등에 따라서 결정되며, 치료법은 대기 관찰요법, 근치적 수술, 근접조사치료법, 방사선치료, 호르몬치료 또는 항암화학요법 등이 있다. 다양한 치료법 중 가장 많이 쓰이는 근치적 수술법과 근접조사치료법에 대해서 간단히 설명하고자 한다. 먼저, 전립선, 정낭, 정관, 골반 림프절을 함께 절제하는 치료법을 근치적 전립선 절제술이라 한다 [6]. 암 조직이 전립선

내부에 존재할 경우 수행되는 대표적인 시술법으로써 복강경 수술을 통해 수행되고 있으며, 최근 수술로봇의 출현에 따라 시술의 정확도 및 시술자의 편의도가 획기적으로 증가하여 각광을 받고 있다. 하지만 수술로봇을 사용했을 때 촉각 정보의 부재나 도구 간의 충돌과 같은 수술 중 발생하는 문제점이 있으며, 수술로봇을 통한 시술 결과가 환자의 부작용을 감소시키거나 생존율을 높인다는 연구결과가 발표되지 않았기 때문에 이러한 부분이 해결되어야 할 과제이다. 근접조사치료법은 환자의 종양 부위에 카테타(catheter) 또는 바늘을 이용해 2mm 크기의 방사선동위원소 시드를 삽입해서 치료하는 방사선치료법이다 [7, 8]. 이 방법은 불필요한 개복 또는 절개수술 없이 전립선 내 종양을 치료할 수 있어서 시술 후 환자의 회복기간이 짧으며 시술 후 부작용이 매우 낮다. 하지만 종양에 따라 적절한 시드 복용량 선택과 정확한 위치에 시드를 이식하는 기술이 해결되어야 할 과제로 남아 있다 [7]. 특히, 시드 이식이 기술적으로 힘든 주된 이유는 조직의 비균질성, 시드의 움직임, 시술 도구의 오차, 삽입 바늘의 편향, 시술자의 오차 등이 있다.

III. 전립선 암 진단을 위한 로봇기술 적용 사례

전립선 암 진단을 위해 다양한 방법이 사용되고 있으나 기존의 진단법을 이용해서 얻은 결과는 질병 진단을 위한 근거로 부족하다. 이러한 한계점에 의해 전립선 암에 의한 사망률을 감소시키기 위해 과잉진단을 하게 되는데, 이는 환자의 삶의 질을 현격히 떨어뜨리는 문제점이 있다. 따라서 무엇보다 전립선 암 진단 시 기존 진단법의 문제점을 극복하여 보다 정확하고 객관적인 진단법을 개발할 필요가 있다. 대표적인 연구는 직장수지검사를 대체할 수 있는 기계시스템 개발 및 이를 위한 기반 연구와 고품질의 실시간 영상정보 획득 방법에 관한 연구가 국내/외 연구팀에 의해 수행되고 있다.

직장수지검사의 한계점을 극복하고 진단 성능을 높이기 위해 정밀하며 객관적, 정량적 진단 결과를 도출할 수 있는 로봇 촉지 시스템에 관한 연구가 수행되었다 [9, 10]. 일본 도호쿠 대학의 Tanaka 교수팀은 전립선 암과 전립선 비대증의 진단을 위한 지름 12mm의 능동 촉지 센서 시스템을 개발했다 [9]. 이 시스템을 이용해서 실험을 수행한 결과 전립선 암이 존재하는 환자를 강성을 통해 구분할 수 있었다. 이 외에도 같은 연구팀에서 직장수지검사 시 의사가 직접 손가락에 끼운 채 검사를 할 수 있는 소형 센서를 개발했다(그림 2) [10]. 본 연구팀에서는 직장에 삽입이 가능한 크기인 직경이 8mm인 로봇 촉지 시스템을 개

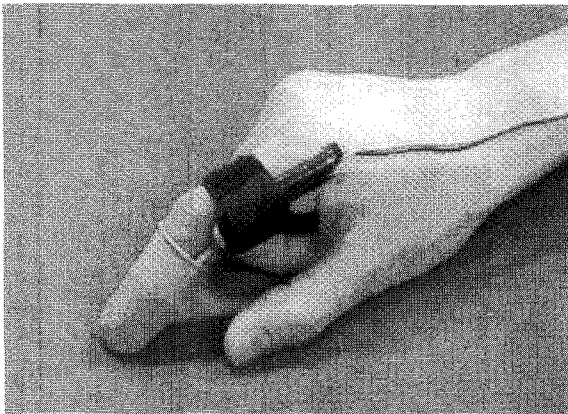


그림 2. 일본 도호쿠 대학에서 개발한 직장수지검사용 손가락 착용 센서 및 진동 모터 (10).

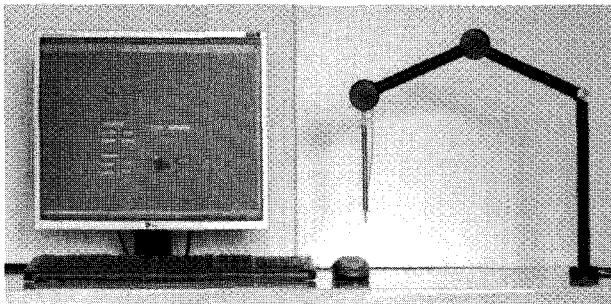


그림 3. 본 연구팀에서 개발한 로봇 촉지 시스템 (10).

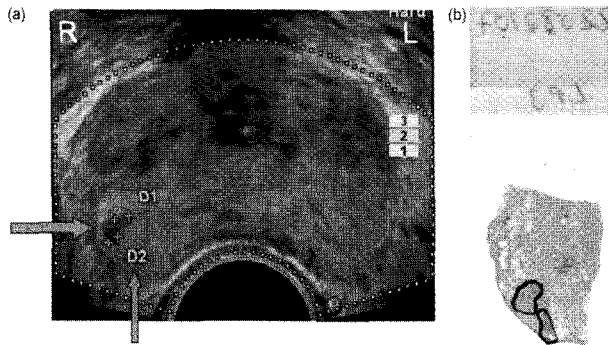


그림 4. (a) 독일 함부르크-에펜도르프 대학병원에서 수행한 elastogram 영상 기반 전립선 암 위치 예측, (b) 조직 병리학적으로 진단한 전립선 암의 위치 (15).

발하고(그림 3), 이를 통해 전립선 각 위치에 따른 정상 및 암조직의 물리적 특성을 획득했다[11]. 이 결과는 전립선 암 진단 시 암 조직의 유무를 판단하는 근거로써 사용할 수 있다.

로봇기술이 적용되고 있는 또 다른 진단법은 고품질의 실시간 영상정보를 통해 대상 조직의 물성을 획득하고 이를 통해 진

단하는 연구가 많이 수행되었다. 대표적인 연구는 elastography이다. 이는 진동을 전달하는 진동자와 다양한 형태의 영상처리 기법을 이용해 장기나 조직의 물리적 특성을 획득하는데 사용되는 방법이다 [12]. 기계적 진동을 측정 대상 조직에 가하면 피부 속 조직에 미세 진동이 발생되며 조직 내부를 통과하게 된다. 이때 매질인 피부의 특성에 따라 진행속도가 달라지게 되는데 이를 측정해서 정해진 영상처리 알고리즘을 거치게 되면 대상 조직의 물리적 특성을 획득할 수 있다. Elastography 개발 및 성능향상을 위해 많은 팀에서 연구를 진행하고 있다 [13, 14]. 독일 베를린자유대학의 벤자민 프랭클린 의료센터는 AC모터의 동작 원리와 유사한 형태인 환형 코일에 흐르는 교류전류를 이용해 조직에 전단파를 인가할 수 있는 진동자를 개발했다 [13]. 기존의 전기기계 구동기가 전기장의 방향과 나란하게 움직이는 단점을 극복했고, 근육과 같은 이방성 조직에 대해서도 적용할 수 있게 했다. 홍콩대학의 Yang 교수팀은 in vivo 상태에서 동물에 삽입된 바늘을 압전변형요소를 통해 길이방향의 움직임을 발생시키고 생체 조직에 전단파를 인가할 수 있는 장치를 개발했다 [14]. 이 장치는 바늘로 접근이 용이한 부위에 대해서는 보다 정확한 조직의 경도 추정이 가능했다. Elastography의 기술적인 부분을 향상시킨 연구 이외에 이 방법을 이용한 여러 임상적 검증을 위한 연구도 수행되었다 [15, 16]. 독일 함부르크-에펜도르프 대학병원 비뇨기과 연구팀은 전립선 암 진단 시 기존의 회색도 초음파의 낮은 감도(sensitivity)와 특이도(specificity)를 극복하고 종양의 위치를 정확하게 파악하기 위해 439명의 환자를 대상으로 elastography 진단한 결과 최대 감도 84% 최소 특이도 67%로 전립선 암의 위치를 파악하는데 회색도 초음파보다 우수한 성능을 보인다는 연구 결과를 얻었다(그림 4) [15]. 일본 츠키바대학 Miyanaga 교수팀은 elastography를 이용해 93%(27명)의 정확도로 전립선 암을 진단했으며 이는 직장수지검사 진단의 59%(17명)와 직장 초음파검사의 55%(16명)보다 정확한 진단을 내릴 수 있음을 보였다 [16]. 비록 elastography를 이용했을 때 두꺼운 조직까지 측정하지 못하는 한계점이 있으나, 간단하고 비침습적이며 상대적으로 저렴한 진단방법이기 때문에 성능검증이 충분히 된다면 널리 사용될 가능성이 있다고 제시했다.

IV. 전립선 암 치료를 위한 로봇기술 적용 사례

본 장에서는 앞에서 언급했던 것과 같이 전립선 암 치료를 위해 주로 사용되고 있는 근치적 수술과 근접조사치료법의 한계점을 극복하기 위한 로봇기술 적용 사례에 대해서 기술하고자

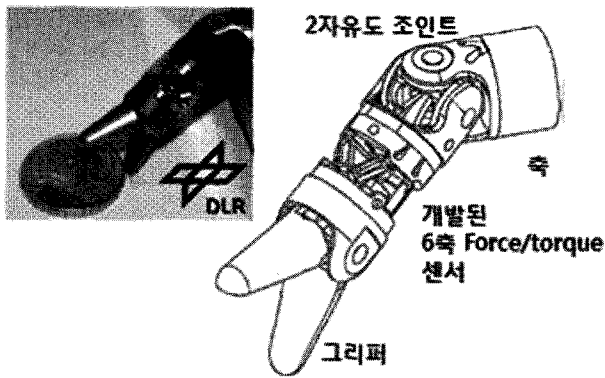


그림 5. 독일항공우주연구소에서 개발된 6축 힘/토크 센서가 부착된 수술도구 [18].

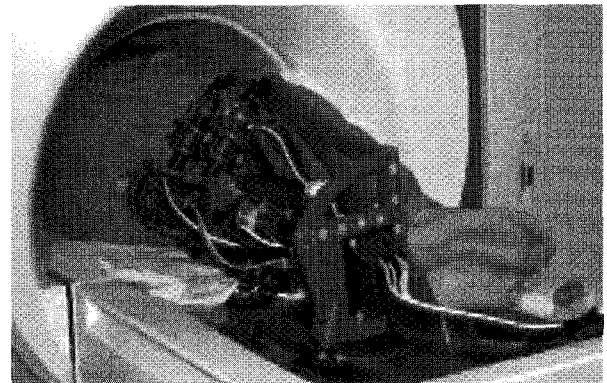


그림 7. 존스홉킨스대학에서 개발한 MRI 유도 전립선 암 치료용 바늘 삽입 로봇 (MrBot) [21].

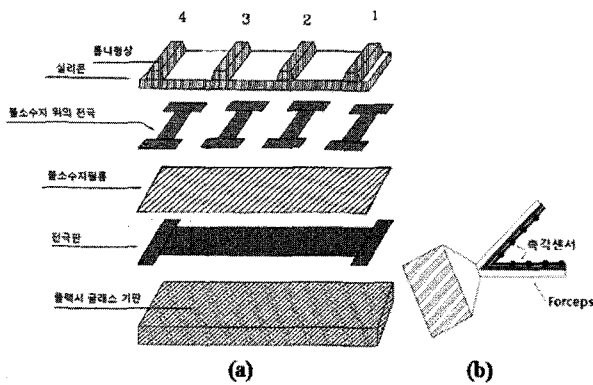


그림 6. 캐나다 세인트존 대학에서 개발한 (a) Forceps용 촉각 센서와 (b) Forceps 적용 사례 [19].

한다.

최근 수술로봇 Da Vinci가 개발됨에 따라 복강경 수술도구를 이용했을 때 보다 충분한 시각정보를 확보했으며, 더 쉽게 시술할 수 있게 되었다. 하지만 사용 시 촉감 정보의 부재나 도구 간에 부딪히는 문제점, 시술 결과의 검증 등이 시급히 해결되어야 하는데, 이를 위해 국내/외 많은 연구팀에서 연구를 진행하고 있다 [17-19]. 미국 UCLA의 Dutson 교수팀은 forceps에 압전 센서를 부착하여 촉감정보를 측정하고 이를 공압 시스템을 이용해서 의사들에게 측정된 정보를 전달해주는 시스템을 구현했다 [17]. 독일 항공우주 연구소의 Seibold 연구팀에서는 Al-CuMg 합금을 사용하여 6각형 구조의 소형 6축 힘/토크 센서를 개발했으며 이를 forceps에 부착해서 시술 시 발생하는 촉감정보를 측정할 수 있는 시스템을 개발했다(그림 6) [18]. 캐나다의 세인트존 대학의 Dargahi 연구팀은 forceps에서 전달되는 접촉력을 측정하기 위해 압전성 고분자를 이용한 압력센서를 개발했다(그림 7) [19]. 수술로봇의 또 다른 문제점은 내부동작에 비해 바깥

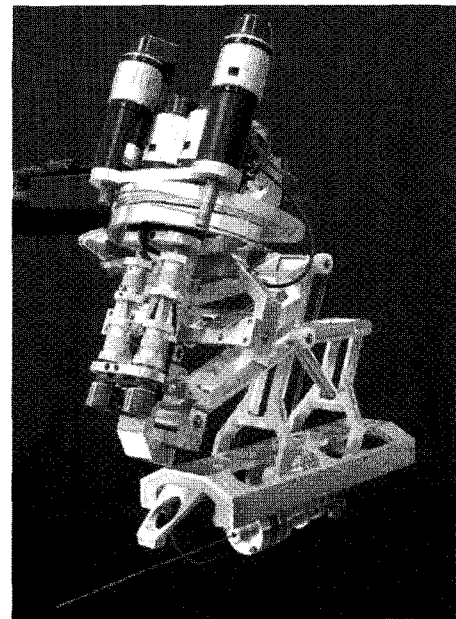


그림 8. 캐나다 웨스턴온타리오 대학에서 개발한 근접조사치료를 위한 마이크로 구동 시스템 [22].

장치의 동작반경이 커서 서로 부딪힐 수 있다는 점이며 이를 해결하기 위해 콜럼비아 대학의 Simaan 교수팀은 21개의 와이어로 구동되어 유연하게 삽입할 수 있는 로봇 기구를 개발하고 있다 [20].

근접조사치료법은 불필요한 개복 또는 절개수술 없이 전립선 내 종양을 치료할 수 있는 방법으로써 가장 효율적인 치료법이다. 하지만 앞서 언급한 한계점을 극복하기 위해서 미국의 존스홉킨스 대학의 Stojanovici 교수팀은 MRI의 영상유도가 가능한 바늘 삽입 장치를 개발했다 [21]. 구성된 장치의 부속은 모두

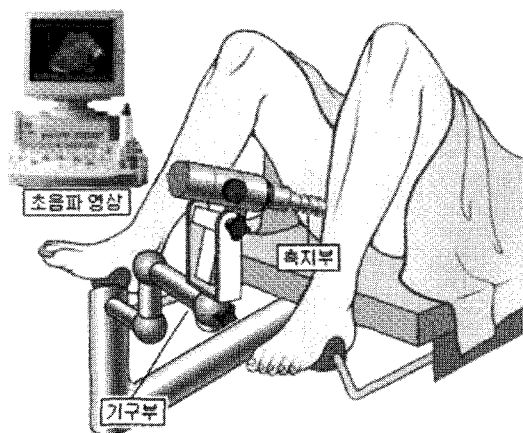


그림 9. 전립선 암 진단 및 치료 시스템.

자성과 극성을 가지지 않는 재료로 이루어져 있으며, 공압을 이용한 모터를 사용했다(그림 7). 이 장치는 차폐형 MRI 장비 내에 모두 통합되어 있으며, 유사 연조직에 실험해 본 결과 0.72 mm 정도의 오차가 발생했다. 캐나다 웨스턴온타리오대학의 Patel 교수팀은 환자의 전립선 암 조직에 방사선 시드를 영구 삽입하는 low-dose rate 근접 조사 치료 시스템을 개발했다(그림 8) [22]. 실제 시술에 적용하기 위해 3D SLICER라는 3D 영상 소프트웨어를 이용하여, 초음파 기반의 영상 유도를 실현했으며, 5 자유도의 구동기에 강인성 제어 알고리즘과 센서를 함께 통합함으로써, 응급 상황의 대처를 가능하게 했다. 유사 연조직에 실험한 결과, 약 1.45 mm 정도의 오차를 보였다.

V. 결론 및 전망

본 문헌 조사를 통해 전립선 암 진단 및 치료를 위한 기존의 방법과 이들의 한계점을 살펴보고, 이를 해결하기 위해 다양한 로봇기술을 적용한 사례들을 분류하고 정리했다. 아직 체계적이고 완성도가 높은 기술과 이론이 확립되지 않았고, 앞으로 해결되어야 할 많은 연구가 있으며 성장 가능성이 높은 연구 분야임은 분명하다.

문헌 조사 결과 전립선 암 진단을 위한 로봇기술을 적용한 사례는 직장수지검사 시 시술자 주관적인 판단과 비정량적인 결과 도출하는 한계점을 극복할 수 있는 로봇 촉지 시스템에 관한 연구와 elastography의 성능을 높이기 위한 연구 또는 성능을 검증하는 연구가 있다. 전립선 암 치료를 위한 연구 사례는 근치적 수술법과 근접조사치료법에 관한 연구가 많이 수행되었다.

근치적 수술을 위해 주로 사용되는 수술로봇의 한계점인 촉감 정보와 관련된 연구가 많이 이뤄지고 있다. 하지만 무엇보다 시술 후 발생하는 부작용을 최소화 할 수 있는 기존 시스템의 문제점을 파악하고 이를 해결할 방법에 관한 연구가 시급하다. 근접조사치료법의 문제점을 극복하기 위해 의료영상 유도 로봇 시스템 개발을 위한 연구가 수행되었으나 아직 임상에 적용할 수 있는 수준의 연구가 진행되지 못했기 때문에 이 또한 시급히 수행 되어야 한다.

전립선 암을 극복하기 위해서는 무엇보다 조기 진단이 수행 되어야 하며, 이후 환자의 상태에 맞는 치료가 수반 될 경우 환자를 위한 최적의 의료 시술이라고 할 수 있다. 하지만 조기 진단을 위한 임상적 연구를 제외 한 다른 연구는 상당히 부족한 현실이며, 무엇보다 아직 전립선 암을 진단할 수 있는 확실한 방법이 없다는 것이 임상 전문가들이 제안하는 가장 큰 문제점이다. 따라서 현재 수행되고 있는 진단법의 한계점을 극복하는 것이 가장 시급하며, 순차적 진단 또는 융합진단이 가능한 시스템 및 그 방법에 관한 연구가 필요하다.

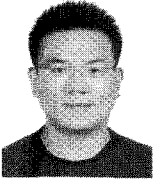
본 문헌 조사를 통해 전립선 암 진단 및 치료를 위한 이상적인 시스템을 그림 9에서 보여주는 것과 같이 제안하고자 한다. 이 시스템은 영상 정보 유도 기반의 로봇 촉지 및 침생검을 수행할 수 있다. 로봇 촉지를 통해 전립선 조직의 물성을 획득하고 문제가 있는 부분을 찾은 뒤 그 위치에서 초음파 영상 유도 하에 침생검을 수행함으로써 빠르고 정확한 진단을 할 수 있으며, 불필요한 침생검을 줄임으로써 진단 과정에서 발생하는 환자의 합병증을 최소화 할 수 있을 것이다. 또한, 조기 진단이 가능할 경우 로봇시스템 기반의 근접조사치료를 통해 진단과 치료를 유기적으로 병행할 수 있을 것이다. 결론적으로 제안한 로봇시스템의 개발이나 이러한 로봇기술 개발 및 적용을 통해 보다 정확하며 친환자적 의료 시술을 제공할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 다양한 의료분야에 로봇기술의 적용을 통해 전립선 암 이외에도 많은 질병을 치료할 수 있는 시스템을 개발할 수 있을 것이며, 이는 환자들에게 삶의 희망을 줄 수 있는 유망한 연구 분야라고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] American Cancer Society, "Cancer Facts and Figures 2008", Atlanta, Ga: American Cancer Society, 2008.
- [2] S. K. Park, L. C. Sakoda, D. Kang, A. P. Chokkalingam, E. Lee, H. R. Shin, Y. O. Ahn, M. H. Shin, C. W. Lee, D. H. Lee, A. Blair, S. S. Devesa, and A. W. Hsing, "Rising prostate cancer rates

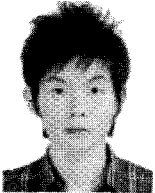
- in South Korea," *The Prostate*, vol. 66, no. 12, pp. 1285-1291, Sep. 2006.
- [3] K. S. Ross, H. B. Carter, J. D. Pearson, and H. A. Guess, "Comparative efficiency of prostate-specific antigen screening strategies for prostate cancer detection," *JAMA*, vol. 284, pp. 1399-1405, 2000.
- [4] L. S. Lim and K. Sherin, "Screening for prostate cancer in U.S. men ACPM position statement on preventive practice," *Am J Prev Med*, vol. 34, pp. 164-170, 2008.
- [5] National Cancer Information Service
- [6] 보건복지가족부, 국립암센터, 국립암정보센터
- [7] G. Fichtinger, J. Fiene, C. W. Kennedy, G. Kronreif, I. I. Iordachita, D. Y. Song, E. C. Burdette, and P. Kazanzides, "Robotic assistance for ultrasound-guided prostate brachytherapy," *Medical image analysis*, vol. 12, pp. 535-545, 2008.
- [8] L. Potters, C. Morgenstern, E. Calugaru, P. Fearn, A. Jassal, J. Presser, and E. Mullen, "12-year outcomes following permanent prostate brachytherapy in patients with clinically localized prostate cancer," *The Journal of Urology*, vol. 173, pp. 1562-1566, 2005.
- [9] M. Tanaka, M. Furubayashi, Y. Tanahashi, and S. Chonan, "Development of an active palpation sensor for detecting prostatic cancer and hypertrophy," *Smart Mater Struct*, vol. 9, pp. 878-884, 2000.
- [10] M. Tanaka, H. Nesori, and Y. Tanahashi, "Development of an Active Palpation Sensor Wearable on a Finger for Detecting Prostate Cancer and Hypertrophy," *Ann of NanoBME*, vol. 1, pp. 141-147, 2008.
- [11] B. Ahn, J. Kim, E.I.S. Lorenzo, K. Rha, and H. Kim, "Mechanical Property Characterization of Prostate Cancer Using a Minimally Motorized Indenter in an Ex Vivo Indentation Experiment," *Urology*, In Press, 2010.
- [12] J. Ophir, I. Cespedes, H. Ponnekanti, Y. Yazdi, and X. Li, "Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues," *Ultrasonic Imaging*, vol. 13, pp. 111-134, 1991.
- [13] J. Braun, K. Braun, and I. Sack, "Electromagnetic actuator for generating variably oriented shear waves in MR elastography," *Magn Reson Med*, vol. 50, no. 1, pp. 220-222, 2003.
- [14] Q. C. Chan, G. Li, R. L. Ehman, R.C. Grimm, R. Li, and E. S. Yang, "Needle shear wave driver for magnetic resonance elastography," *Magn Reson Med*, vol. 55, no. 5, pp. 1175-1179, 2006.
- [15] G. Salomon, J. Köllerman, I. Thederan, F. K. H. Chun, L. Budäus, T. Schlomm, H. Isbarn, H. Heinzer, H. Huland, and M. Graefen, "Evaluation of Prostate Cancer Detection with Ultrasound Real-Time Elastography: A Comparison with Step Section Pathological Analysis after Radical Prostatectomy," *European Urology*, vol. 54, no. 6, pp. 1354-1362, 2008.
- [16] N. Miyanaga, H. Akaza, M. Yamakawa, T. Oikawa, N. Sekido, S. Hinotsu, K. Kawai, T. Shimazui, and T. Shina, "Tissue elasticity imaging for diagnosis of prostate cancer : A preliminary report," *International Journal of Urology*, vol. 13, no. 12, pp. 1514-1518, 2006.
- [17] C. Wottawa, R. E. Fan, C. E. Lewis, B. Jordan, O. Martin, S. Warren, Grundfest, and E.P. Dutson, "Laparoscopic Grasper with an Integrated Tactile Feedback System," *Complex Medical Engineering, 2009. CME. ICME International Conference on*, pp. 1-5, 2009.
- [18] B. Kuebler, U. Seibold, and G. Hirzinger, "Development of actuated and sensor integrated forceps for minimally invasive surgery," *International Journal of Medical Robot. Computer Assisted Surgery*, vol. 1, no.3, pp. 96-107, 2005.
- [19] J. Dargahi, M. Parameswaran, and S. Payandeh, "A micromachined piezoelectric tactile sensor for an endoscopic grasper - theory, fabrication and experiments," *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 9, no. 3, pp. 329-335, Sep. 2000.
- [20] J. Ding, K. Xu, R. Goldman, P. Allen, D. Fowler, and N. Simaan, "Design, Simulation and Evaluation of Kinematic Alternatives for Insertable Robotic Effectors Platforms in Single Port Access Surgery," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1053-1058, 2010.
- [21] M. Muntener, A. Patriciu, D. Petrisor, D. Mazilu, H. Bagga, L. Kavoussi, K. Cleary, and D. Stoianovici, "Magnetic resonance imaging compatible robotic system for fully automated brachytherapy seed placement," *Urology*, vol. 68, pp. 1313-1317, 2006.
- [22] H. S. Bassan, R. V. Patel, and M. Moallem, "A novel manipulator for percutaneous needle insertion: Design and experimentation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 6, pp. 746-761, Dec. 2009.

○ 저자약력



안 범 모

- 2005년 부산대학교 기계공학부 졸업.
- 2007년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사).
- 2007년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 재학 중.
- 관심분야 : 의료 로봇, 제어, 생체조직 물성 규명.



박 기 한

- 2009년 한국과학기술원 기계공학과 졸업.
- 2009년~현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정 재학 중.
- 관심분야 : 의료로봇 및 제어.



이 효 상

- 2010년 고려대학교 기계공학부 졸업.
- 2010년~현재 한국과학기술원 로봇공학학제전공 석사과정 재학 중.
- 관심분야 : 의료로봇 및 제어.



김 정

- 1991년 한국과학기술원 정밀공학과(공학사).
- 1993년 한국과학기술원 정밀공학과(공학석사).
- 2004년 MIT 기계공학과(공학박사).
- 2005년~현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수.
- 관심분야 : 의료로봇, 생체신호 측정, 인간-기계 상호 작용, 세포 조작.