

김 승 원 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 선임연구원

| e-mail : demian05@snu.ac.kr

조 규 진 서울대학교 기계항공공학부 부교수

| e-mail : kjcho@snu.ac.kr

소프트 로보틱스는 고무와 같이 유연한 소재를 활용하여 외부 환경에 대한 적응성이 증진된 새로운 로봇 메커니즘과 관련 기술의 연구 및 개발을 목적으로 하는 로봇 학문이다. 이 글에서는 소프트 로보틱스에 대한 개괄적인 소개와 함께 국내외 연구 동향과 향후 전망에 대하여 기술하고, 앞으로 소프트 로보틱스가 발전하고 실용화를 위해 해결해야 할 방향을 제시하고자 한다.

소프트 로보틱스 개요

지난 60여 년간의 로봇 역사를 살펴보면, 정해진 환경에서 작업하는 산업용 로봇에서 필드 로봇, 서비스 및 의료 로봇, 휴머노이드 등 로봇의 활동 영역이 점점 더 복잡하고 다양한 비정형 환경으로 확장되었다. 이러한 비정형 환경에서 로봇이 동작하기 위해서는 외부 환경에 대응할 수 있는 기술들이 필요하다. 이에 강체 시스템에 기반을 둔 기술들로서 가변 강성 구동기(Variable stiffness actuator), 부족구동 메커니즘(Under-actuation mechanism), 임피던스 제어, 조인트-토크 제어, 연속체 로봇 디자인 등이 개발되었다. 그러나 이러한 기술들로는 대응할 수 있는 환경 조건이 유한하기 때문에 여전히 로봇의 동작 환경이 확장되는데 어려움이 있다. 이와는 달리 생물들은 신체 구성 물질과 구조의 유연성을 바탕으로 다양하고 가변적인 자연 환경에 적응하고 있다. 대표적인 연체동물인 문어는 신체 대부분이 근육으로 이루어져 있기 때문에 외부 지형에 맞춰 몸의 형태를 수축과 이완을 통해 다양하게 변형시킬 수 있다. 이처럼 생물들이 가진 연성 기반 적응성에 착안하여 부드러운 소재

를 로보틱스에 활용하고자 하는 움직임으로 소프트 로봇의 시대가 시작되었다.

소프트 로보틱스의 기원은 명확하게 정리된 것이 없으나, 현재의 소프트 로보틱스를 기준으로 종합적인 로봇 시스템의 관점에서 볼 때 1988년에 동경공업대학교의 Shigeo Hirose 교수가 ICRA 학회에서 발표한 능동 내시경용 형상기억합금 서보 액추에이터 시스템과 1989년에 도시바 사 Koichi Suzumori 연구원(현 동경공업대학 교수)이 일본 기계학회 논문집에 발표한 유연 마이크로 액추에이터가 소프트 로보틱스의 시초라 할 수 있다. 이 연구 결과물에 사용된 메커니즘, 구동기 및 동작 성능을 살펴보면, 여기에 사용된 기술적 수준이 현대 소프트 로보틱스의 기술 수준과 거의 차이가 없다고 볼 수 있다. 그러나 소프트 로보틱스에 대한 기술적인 수요와 관심이 낮고 이를 지원할 수 있는 소재가 다양하지 않았던 관계로, 연속체 및 뱀형 로봇 연구 분야에서 명맥을 유지한 채 소프트 로보틱스가 하나의 연구 분야로 자리를 잡기까지는 약 20년이 걸렸다.

소프트 로보틱스가 다시 주목을 받게 된 계기는 2007년에 미국 국방성 방위고등연구계획국(DARPA)

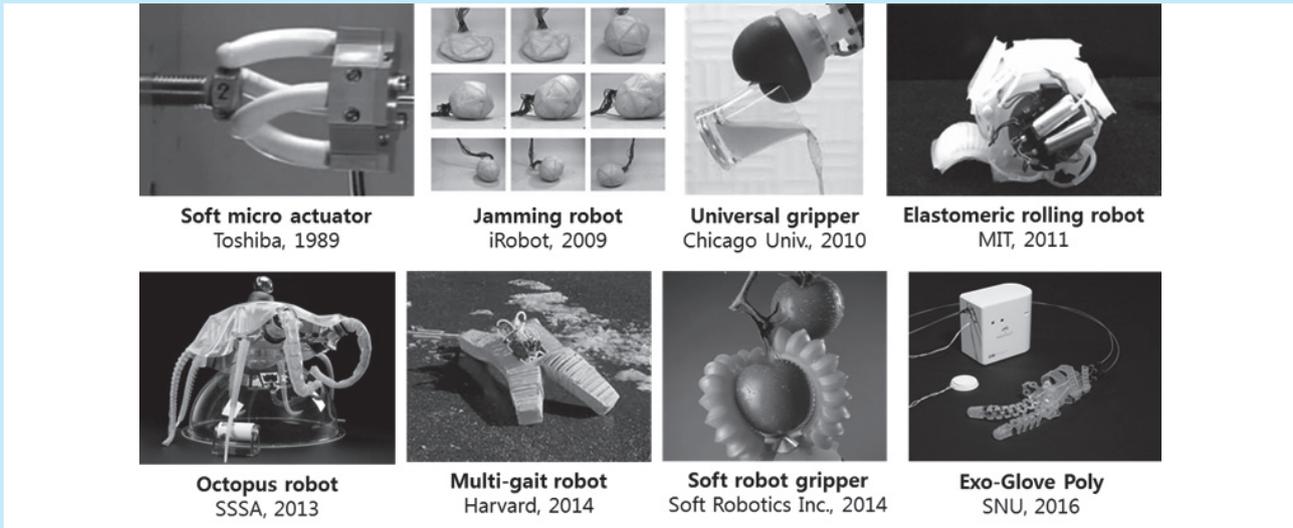


그림 1 소프트 로봇 예시

이 발표한 Chembot 프로젝트이다. 이 과제는 부드럽고 유연한 소재를 활용하여 하나의 개체가 다양한 지형을 극복하고 다중 임무를 수행하는 로봇의 개발을 목표로 하였다. 이것을 통해서 2009년에 iRobot사의 재밍(jamming) 로봇을 시작으로 다양한 형태의 소프트 로봇들이 탄생하였다. 그리고 소프트 로봇들이 실생활에 어플리케이션으로 활용 가능성을 보여 소프트 로보틱스는 다시금 로봇 학계에서 관심을 가지게 되었다.

소프트 로보틱스 요소 기술

소프트 로보틱스는 로봇의 외부 환경에 대한 적응성이 향상되도록 유연성과 신축성을 포함하는 부드러운 성질을 반영한 로봇의 변형과 동작을 생성한다. 이를 위해 소프트 로보틱스에서는 크게 네 가지의 범주로 소재의 특성을 활용한 연성 메커니즘, 구조 설계 및 제조, 구동기 및 센서, 제어 알고리즘을 다룬다.

연성 메커니즘

소프트 로보틱스는 폴리머, 종이, 천, 필름, 얇은 금

속 박막과 같이 강성이 작은 소재를 활용한다. 이러한 작은 강성의 소재가 링크와 조인트로 활용되어 움직임 생성하는 것이 연성(compliant) 메커니즘이다. 연성 메커니즘을 이용하는 소프트 로봇의 구조는 기존의 강체 기반 로봇 구조와는 달리 링크와 조인트의 구분이 모호하거나 두 요소가 일체화된 것이 특징이다. 그리고 자유도가 강체 기반 로봇에 비해 상대적으로 많기 때문에 여유 자유도(redundant degree-of-freedom)를 가지며 부족구동(under-actuation)을 한다.

따라서 연성 메커니즘 기반의 소프트 로봇은 로봇이 가지고 있는 자유도에 비해 적은 수의 구동기로 다양한 움직임을 생성할 수 있어서 외부 지형과 물체 형상에 쉽게 적응할 수 있다. 연성 메커니즘을 이용하는 소프트 로봇은 MIT대학 Daniela Rus 교수 연구진의 물고기 로봇과 서울대학교 조규진 교수 연구진의 바퀴 직경을 조절할 수 있는 오리가미 바퀴 로봇 등이 있다.

구조 설계 및 제조

소프트 로봇의 구조 설계 및 제조는 기존의 강체 기

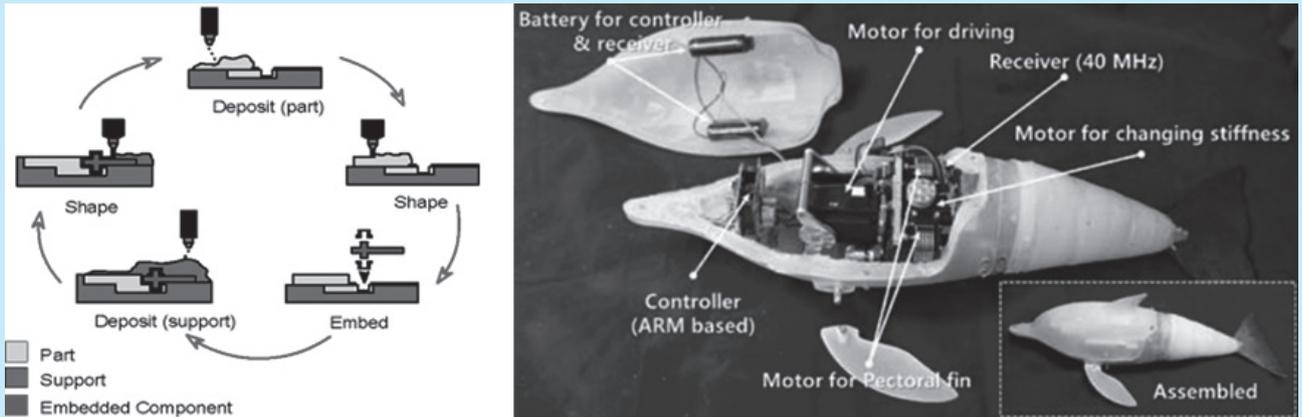


그림 2 형상 적층 제조(SDM) 공정 개념도 및 SDM을 이용하여 만든 돌고래 로봇

반 로봇을 제작하는 데 사용하는 절삭 가공과 주조 성형, 볼트와 너트를 통한 부품 조립 공정과는 다른 방식으로 진행된다. 소프트 로봇에 사용되는 대표적인 소재인 폴리머로 만드는 구조는 몰드 성형을 통해 생산된다. 과거에는 몰드 성형을 위한 주형틀을 금속으로 제작하기에 단순한 형상에 대해서도 몰드 제작 시간이 오래 걸리고 제조 단가가 높았다. 하지만 3D 프린터를 이용하면 복잡한 형상을 갖는 몰드의 생산 시간이 상대적으로 짧으면서 생산 단가가 낮은 장점이 있어 소프트 로보틱스에서는 3D 프린팅 몰드를 주로 사용한다. 그리고 이러한 몰드 성형 공정을 모터와 센서 등의 다양한 기계요소 부품들의 조립 공정과 합쳐 로봇을 제작하는 방식으로 형상 적층 제조(SDM: shape deposition manufacturing) 공정이 있다. 이 공정은 1990년대 기계 가공에 있어 CAD를 이용한 임의 형상 제작(SFF: solid free-form fabrication) 공정에서 시작하였다. SDM 공정의 장점은 CAD와 CNC의 정밀한 설계 및 가공을 통해 정확한 형태 조형과 기계요소들의 배치와 함께 강성 재료와 연성 재료를 같이 사용한 단일 구조의 제작이 가능한 것이다. 이 SDM 공정을 Stanford 대학의 Mark Cutkosky 교수 연구진이 발전시켜 로봇 제작에 처음으로 활용하여, 바퀴벌레의 빠른 주행 동작을 모사한 iSprawl과

게코 도마뱀의 매끄러운 벽면 등반 움직임을 모사한 Stickybot이 개발되었다. 이후 SDM 공정은 하버드대의 Robert Howe 교수 연구진이 제작한 SDM 로봇 손, 서울대의 조규진 교수 연구진이 개발한 돌고래 로봇 등 다양한 소프트 로봇과 생체모사 로봇의 제작에 기여하여 소프트 로봇 제조 기술의 한 갈래로 자리를 잡았다.

한편 3D 프린터 기술이 발전함에 따라 강성과 연성의 이종 재료를 동시에 사용하여 부위별로 다양한 강성이 존재하는 소프트 로봇의 제작이 가능해졌다. 초기 3D 프린터의 경우 플라스틱 종류의 ABS 소재로 단단한 구조물만 제작이 가능했다. 하지만 최근에는 금속과 더불어 고무와 같은 연성 소재를 사용할 수 있으며, 두 가지 이상의 재료를 한 번에 사출할 수 있다. 그 결과 구조의 강성을 재료 조성비에 따라 다양하게 조절할 수 있고, 하나의 구조에도 연성 부분과 강성 부분이 개별적으로 존재할 수 있게 되었다. 이를 활용하여 Tufts대의 Barry Trimmer 교수 연구진은 소프트 애벌레 로봇의 비대칭 마찰계수를 가진 다리를 제작하는데 3D 프린터를 사용하였으며, 하버드대의 George Whitesides 교수와 Robert Wood 교수 연구진은 연소 폭발을 이용한 추진력으로 도약하는 소프트 로봇을 만들었다.

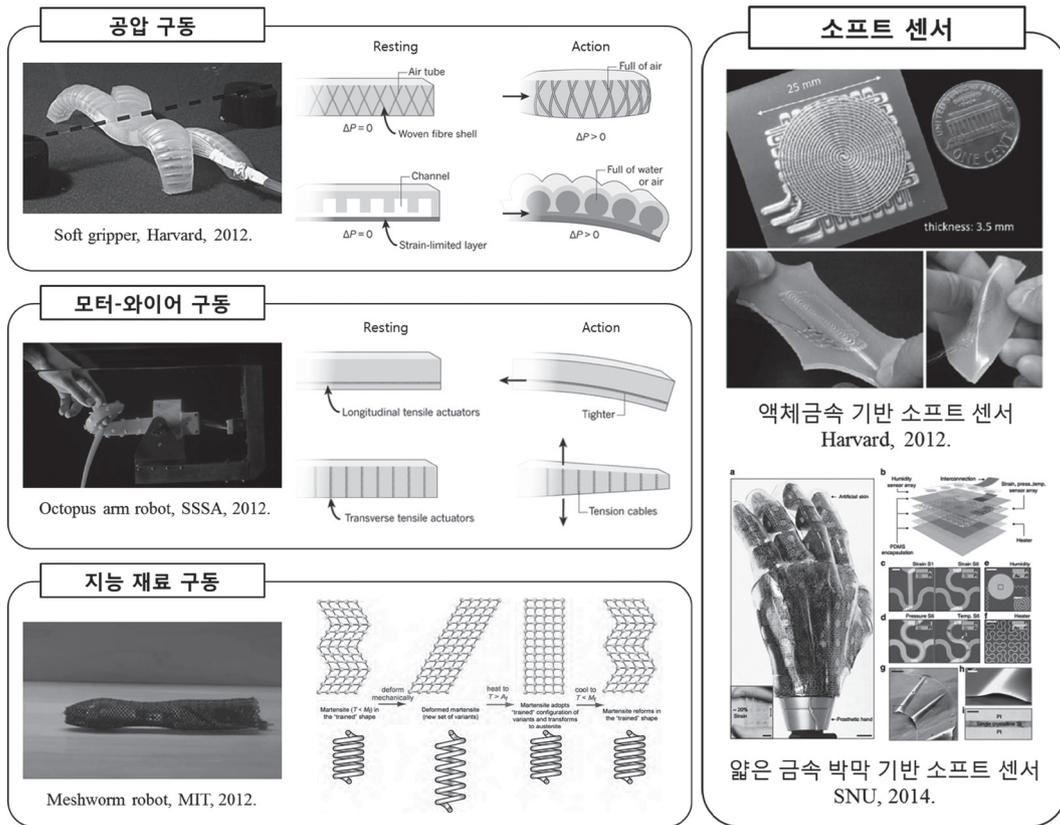


그림 3 소프트 로봇에 사용되는 구동 방식 및 소프트 센서

구동기 및 센서

소프트 로보틱스에서 사용하는 구동 방식은 크게 세 가지로 공압 구동, 모터-와이어 구동, 지능 재료를 이용한 구동이 있다. 폴리머로 이루어진 구조는 조인트와 링크의 경계가 구분되지 않아서 움직임을 생성하는 데 자유도가 무수히 많지만 이를 제어할 구동기의 수는 한정되어 있다. 공압 구동 방식은 외부 장치에서 압력을 조절하면 로봇 구조 내부의 공기 통로를 통해서 분산되어 있는 각 부분의 에어 챔버들의 부피 변화가 일어난다. 그리고 이 부피 변화를 통해 구조 전체에 구동력을 전달하고 움직임을 생성한다. 이때 에어 챔버의 위치, 물성, 두께의 변화와 구속 장치의 추가 등을 통해 구조의 변형을 제어한다. 대표적인 공압 구동 방식의 소프트 로봇은 하버드대 George

Whitesides 교수 연구진의 험지 극복용 Multi-gait 소프트 로봇이 있다. 하지만 공압 구동의 경우 일반적으로 압력을 조절하는 장치인 압축기의 부피가 크고 무거운 단점이 있다. 또한 로봇 구조의 부피 변화로 인해 다른 구조를 접합하여 동작하는데 한계가 있다.

모터-와이어 구동의 경우 모터에 연결된 와이어의 한쪽 끝단이 동력을 전달하는 최종 부위에 고정되어 있고, 와이어가 설계된 경로를 따라 배치되어 있다. 이러한 구조에서 모터가 구동하면 와이어의 경로에서 선택적으로 고정된 연결 부분에 동력이 전달되며 로봇이 움직이게 된다. 따라서 공압 구동에 비해 구조가 단순하고 가벼운 장점이 있으나, 와이어의 동력이 전달되는 경로에서 발생하는 마찰로 인해 구동 효율이 낮아질 수 있다. 대표적인 모터-와이어 구동 방식

의 소프트 로봇은 이태리의 Scuola Superiore Sant' Anna 대학의 Cecilia Laschi 교수 연구진의 생체모사 문어 로봇과 서울대 조규진 교수 연구진이 개발한 장애인용 보조기기인 Exo-Glove Poly가 있다.

소프트 로보틱스에 활용되는 지능 재료 구동기로는 형상 기억 합금(shape memory alloy, SMA), 형상 기억 폴리머(shape memory polymer, SMP), 고분자 유전 탄성체(dielectric elastomer actuator, DEA), 이온 고분자 금속 복합재(ionic polymer metal composite, IPMC) 등이 있다. 이러한 지능 재료 구동기는 다양한 형태로 성형이 가능하며, 특히 작은 크기에서 무게 대비 출력 성능이 우수하다. 이러한 장점을 활용하여 지능 재료 구동기는 압축기와 모터 등의 구동기를 사용할 수 없는 경량 구조와 초소형 구조의 소프트 로봇에 사용되고 있다. 하지만 지능 재료 구동기는 에너지 변환 과정에서의 손실로 인한 낮은 에너지 효율, 느린 구동 속도 또는 작은 구동 변위와 단점으로 존재한다. 지능 재료 구동기를 이용하는 대표적인 소프트 로봇은 MIT 김상배 교수 연구진이 SMA를 사용하여 지렁이의 움직임을 구현한 Meshworm 로봇이 있다.

한편 소프트 로봇에 사용되는 센서는 연속적인 변형을 측정할 수 있으며 구조가 그 변형을 따라갈 수 있는 신축성이 있어야 한다. 이를 위해 다양한 센서들이 개발되고 있는데, 이중에서 대표적인 소프트 센서로 두 가지가 있다. 하나는 액체 금속 기반의 소프트 센서로, 특정 패턴으로 액체 금속을 주입하여 구조의 변형에 따른 액체 금속 패턴의 저항 변화로 변위를 측정한다. 다른 하나는 주름진 금속 박막 패턴을 이용하여 큰 변형에도 측정 감도가 유지되는 폴리머 시트 기반의 소프트 센서이다.

제어 알고리즘

현재의 소프트 로보틱스는 하드웨어 기반의 메커니즘과 구조 설계 및 구동기와 센서 등의 요소 개발이

주요 연구 분야이다. 하지만 소프트 로봇의 구조적 특징을 살릴 수 있는 제어 알고리즘 또한 중요한 부분이다. 최근 소프트 로보틱스에서 다루고 있는 제어는 기존의 위치 기반 PID 제어 이외에 신경망 알고리즘 기반의 제어를 시도하고 있으며, 대표적인 신경망 알고리즘으로는 로봇에 기본적인 제어 신호를 주기적인 패턴으로 전송하며 센서 피드백 없이 동작을 생성하는 중앙 패턴 생성기(central pattern generators, CPG)가 있다.

국내외 연구 동향

오늘날에 소프트 로보틱스는 전 세계적으로 연구가 진행되고 있다. Thomson Reuters社의 Web of Science에서 Core Collection Analysis를 이용하여 소프트 로보틱스 주제로 검색한 결과, 2016년 2월 기준으로 946편의 논문들이 발표되었다. 이 결과를 살펴보면 발표되는 논문의 수가 점진적으로 증가하다가 2010년을 기점으로 급증하는 추세이다. 이를 통해 2010년이 소프트 로보틱스 시대의 시작으로 볼 수 있다. 한편 논문들이 나온 국가를 조사한 결과, 약 77%에 해당하는 논문들이 미국과 유럽 연합(EU)에서 나왔으며, 일본, 캐나다, 한국, 중국 순으로 논문들이 나오고 있다.

앞서 언급한 미국에서는 DARPA의 지원으로 소프트 로봇 연구가 시작되어 Chembot 프로젝트가 종료된 이후에도 꾸준히 학계에서 진행되고 있다. 대표적인 연구 기관으로는 유니버설 그리퍼를 개발한 시카고대, 코넬대, iRobot社 외에 MIT(Daniela Rus 교수, 김상배 교수), 하버드대(George Whitesides 교수, Robert Wood 교수, Conor Walsh 교수), Tufts대(Barry Trimmer 교수), 카네기멜론대(Carmel Majidi 교수), Worcester Polytechnic Institute(Cagdas Onal 교수), Soft Robotics Inc. 등이 있다. 한편 EU에서는 7차 연구개발 체제 계획

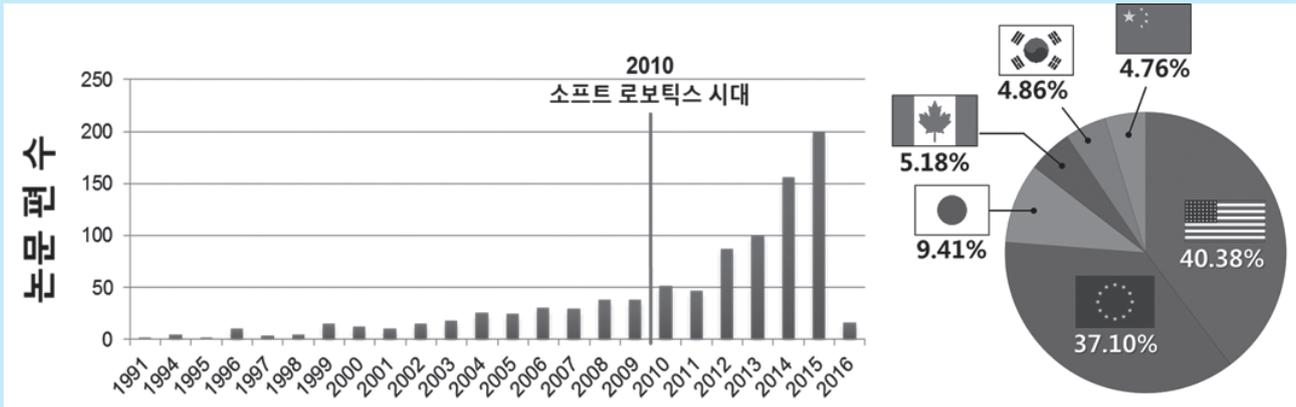


그림 4 연도별 소프트웨어 로봇틱스 관련 논문 편수 및 연구기관 소속 국가 비율

(FP7: 7th Framework Programme) 지원으로 문어의 형태와 동작을 모사하여 새로운 소프트웨어 로봇을 개발하는 것을 목표로 OCTOPUS 프로젝트를 통해 소프트웨어 로봇 연구가 진행되었다. 그리고 프로젝트가 종료된 이후에는 후속 연구 과제로 수술용 소프트웨어 로봇을 연구하는 STIFF-FLOP 프로젝트가 진행되었다. 유럽 내에서 소프트웨어 로봇을 연구하는 대표적인 기관으로 Scuola Superiore Sant'Anna(Paolo Dario 교수, Cecilia Laschi 교수, Matteo Cianchetti 교수), IIT(Fabio Benfenati 교수, Darwin Caldwell 교수), 브리스톨대(Jonathan Rossiter 교수), EPFL(Dario Floreano 교수, Shea Herber 교수, Jamie Paik 교수), 캠프릿지대(Fumiya Iida 교수) 등이 있다.

국내에서의 소프트웨어 로봇틱스 연구는 정부가 지원하는 과제를 통해서 연구가 진행되기 보다는 소수의 대학교의 연구실 수준에서 소프트웨어 로봇, 액추에이터 및 센서, 제어 알고리즘이 개별적으로 분산되어 진행되고 있는 실정이다. 이에 국내의 소프트웨어 로봇틱스 기술 경쟁력을 높이기 위해서는 정부의 지원으로 여러 기관이 연합한 연구단을 구성하여 각각의 소프트웨어 로봇틱스 연구 분야의 발전과 함께 각 연구 분야가 시너지 효과를 발동할 수 있는 환경을 조성할 필요가 있다.

맺음말

소프트 로봇틱스는 우리가 일반적으로 접하는 강체 기반의 로봇이 아닌 유연하고 부드러운 소재를 활용하는 로봇을 다룬다. 이 때문에 기존의 로봇 공학에서 사용하던 설계, 제조, 동작의 생성 및 제어 방식과는 다른 기술들이 필요하다. 이를 위해 연성 메커니즘, SDM 제조 공정, 새로운 형태의 구동기 및 센서, 신경망 알고리즘 등이 개발되었으며, 이 외에도 다양한 기술들이 개발되고 있다. 소프트웨어 로봇틱스는 연성 소재의 특성을 살려 기존의 강체 기반 로봇에 비해 외부 환경에 대한 적응성과 안정성 등이 증진된 새로운 메커니즘과 로봇의 개발에 기여할 것이다. 소프트웨어 로봇이 활용될 수 있는 곳으로 기대되는 분야는 공업, 농업, 화훼, 식품 산업, 의료 및 재활, 개인 보조기기, 수중 탐사, 군용, 엔터테인먼트 등 일상생활과 산업 전반에 걸쳐있다. 하지만 활용 범위가 무궁무진한 소프트웨어 로봇틱스는 실용화를 위해 소재 개발, 연속체 모델링 및 제어, 구동기 효율 향상 등 해결해야 할 문제가 많이 남아있다. 따라서 소프트웨어 로봇틱스는 정부와 산업체 및 학계의 더 많은 관심과 지원을 바탕으로 요소기술을 확립할 수 있는 지속적인 연구가 필요하다.