KICEM

로봇 기반 건설자동화 기술개발 현황 및 전망

김태훈
조선대학교 건축공학과 부교수, thoonkim@chosun.ac.kr
임현수
순천향대학교 건축학과 조교수, hslim@sch.ac.kr
조성진
빌딩포인트코리아 빌딩솔루션팀 과장, sjcho2@buildingpoint.co.kr

1. 머리말

4차 산업혁명 시대의 도래와 포스트 코로나 시대에서의 생존과 번창을 위하여 건설산업의 전 생산주기에 걸쳐 다양한 스마트 건설기술의 도입을 통한 생산성 혁신 및 신성장동력 확보를 추구하고 있다. 디지털 혁신에 기초한 스마트 건설기술의 활용을 통해 10년 내 건설 생애주기 비용의 12~20% 절감 효과가 있을 것으로 기대되고 있으며, KPMG[1]는 발주기관, 건설 및 엔지니어링 회사를 대상으로 상위 20% 그룹을 '혁신적 리더(innovative leaders)', 중앙의 60%를 '추격자(followers)' 그룹, 하위 20%를 '지체자(behind the curve)' 그룹으로 구분하여 스마트 건설 기술의 적용 비율을 조사한 결과, 그룹간 기업과 현장에서의 스마트 건축기술 적용 비율이 유의한 차이를 보일 뿐 아니라 향후 5~10년 이내 격차는 더욱 벌어질 것으로 예상되었다. 이는 스마트 건설 기술의 활용 여부가 미래 건설기업의 경쟁력을 떠나 생존에까지 영향을 미칠 것임을 의미한다.

국내 건설산업의 정부 정책 방향 또한 건설 프로세스 전반에 걸친 스마트 건설기술의 활용을 촉진하고 있으며, 이 중 로봇을 활용한 건설 자동화 기술의 도입은 하나의 주요한 축을 이루고 있다. 제1차 국토교통과학기술 연구개발종합계획(2018~2027)에서는 국토교통 8대 혁신성장동력 중 하나로 자율구동 건설 장비 · 로봇 기술을 포함한 "건설 자동화 분야"를 선정하여 중점적으로 육성할 계획에 있으며, 2018년 건설산업 혁신방안에서는 2020~27년까지 약 2,000억원을 '건설 자동화' 분야에 투입하여 핵심 기술을 보급하는 것을 목표로 설정하였다. 또한, 국토교통부는 지난 해 건설교통분야에서 미래 시장규모, 기술성, 실현 가능성을 고려해 2030년까지 집중할 20대 유망기술(20-Wonder)을 선정해 발표하였으며, 이 중 산업현장의 비대면 기술 확산을 위한 핵심기술 중 하나로 디지털 설계정보를 기반으로 하는 미래형 건설로봇 기술인 "스마트 건설 로봇"을 선정하였다[2]. 이와 같이 건설로봇을 활용한 자동화 분야는 인공지능, 센싱기술 등과의 융합을 통한 지속적인 성장이 예상되며, 시장형성 단계인만큼 기술개발을 통한 시장선점이 중요한 시점이라 할 수 있다.

2. 건설로봇 시장 및 기술동향

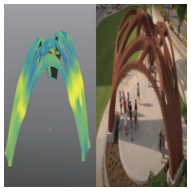
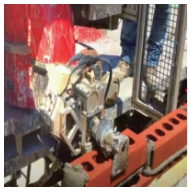
건설 분야에 3D 프린팅 기술이 도입되면서 건설 로봇 활용의 새로운 가능성을 창출하고, 세계적인 도시화 추세가 건설로봇 시장의 성장을 가속화하고 있다. 글로벌 리서치기업인 Tractica에서는 건설 로봇의 시장 규모가 2018년 2,270만 달러(약 255억원)에서 2025년에는 2억 2,600만 달러(약 2,476억원)로 성장할 것으로 예상하고 있으며, Markets and Markets[3]에 따르면, 건설 로봇 시장은 2023년까지 1억

1) https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/04/global-construction-survey-2019.pdf
2) 국토교통부 보도자료, 2020.5.6.
3) Markets and Markets, Construction Robot Market by Type (Traditional, Robotic Arm, and Exoskeleton), Automation, Function, Application (Public Infrastructure, Commercial and Residential Buildings, Nuclear Dismantling and Demolition), and Geography - Global Forecast to 2023, 2018.

6,640만달러 규모로 2018~2023년 연평균 16.8%의 성장세를 보일 것으로 예상하고 있다. 건설로봇의 도입을 통한 주요 효과로 노동인력의 부족 대체, 안전성 향상, 생산성 향상, 품질 향상을 꼽고 있으며, 이를 통한 공사비 및 공기 절감에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다. 부족한 인력을 건설로봇으로 대체할 경우 노령화로 인한 인력 부족 및 위험작업의 안전성 문제 또한 해결될 수 있다. 특히 시공오차 및 잘못된 의사소통으로 인한 재작업 비용은 미국 건설 회사에서 연간 약 650억 달러로 추정[4]되고 있으며, 이로 인해 대부분의 건설 프로젝트가 예산을 초과하고 20%이상의 프로젝트가 공기가 지연되고 있는 실정이다[5]. 이에 건설 로봇으로 작업할 경우 사전 오류 검토 및 시공정확도 향상으로 낭비되는 금액의 절감이 가능하며, 건설산업 자체의 체질개선에 크게 기여할 것으로 기대된다.

국내 건설로봇 시장은 별도의 건설로봇 분류를 적용하고 있지 않는 실정으로 제조업 로봇시장을 토대로 시장규모를 유추해볼 수 있다. 국내 로봇시장은 2018년 매출액 기준 약 5.8조 규모로 연평균 12.4%로 성장 중이며, 제조업용 로봇을 중심으로 시장이 형성되어 있다. Markets and Markets에서 발표한 글로벌 시장조사 보고서에 따르면 국내 전체 로봇시장 중 협동로봇 시장은 지난 2016년 840만달러에서 2017년 1,900만달러로 무려 226.2%라는 성장률을 나타냈다. 또한, 2025년까지 연평균 52.44% 성장해 6억6,860만달러까지 성장할 것으로 전망하고 있으며, 이러한 성장률은 중국, 일본

표 1. 건설로봇 10대 대표기업 및 기술현황

기업 (국가)	사진	개발 기술	기업 (국가)	사진	개발 기술
Advanced Construction Robotics (미국)		· 타이봇 (철근 결속 로봇) · 아이언봇 (철근 자율 운반 및 배치)	Fastbricks Robotics (호주)		· Hadrian X (트럭 등에 장착 가능한 건설 로봇) · Fastbrick Wall System
KEWAZO (독일)		· 가시설물 조립 프로세스 개선 가능한 스마트 로봇 엘리베이터	Hyperion Robotics (핀란드)		· Hyperion 3D 프린팅 시스템
OKIBO (이스라엘)		· 벽체 미장 (회반죽 도포)용 자율 시공 로봇	Branch Technology (미국)		· 설계·디지털 모델링 (알고리즘 및 프로세스) · 3D 프린팅 시공 기술
Built Robotics (미국)		· 자율 시공 굴삭기, 자율 시공 도저 등 Machine Control(MC) 모듈	Dusty Robotics (미국)		· 도면 정보를 현장에서 매칭 가능한 레이아웃 로봇 · Amber (데이터 플랫폼)
Construction Robotics (미국)		· Mule135 (135lb 자재 취급용 리프트 장치) · SAM100 (조적식 구조물 시공용 벽돌 쌓기 로봇)	Scaled Robotics (스페인)		· 건설 프로젝트 진행상황 추적 가능한 현장 모니터링 로봇

4) '10 robotics startups to watch in 2019', the robotrepoet, 2019

5) 'The next normal in construction', McKinsey, 2020

다음으로 높은 수치이다[6]. 기존의 산업로봇 시장에 비중이 큰 현대로보틱스와 두산로보틱스는 기술력을 바탕으로 영업력을 지속적으로 확장하고 있으며, 삼성전자와 현대위아는 로봇개발팀을 신설하여 시장에 진입하려고 하는 상황으로, 산업용 로봇 시장에 대한 수요가 매우 크며 향후 시장의 확장성이 매우 큰 분야로 판단된다. 건설로봇 분야 역시 산업용 로봇 분야와 함께 지속적인 성장이 예상되며, 현재 건설로봇 시장은 실제 작업을 수행하여 생산성과 안전성을 향상시키는 중장비 및 관절 로봇 시장이 주를 이루고 있으나, 측량 및 검측, 현장정보 전달, 자재 이동과 같이 비생산작업의 효율과 정확성을 향상시켜 낭비되는 비용과 시간을 절감하는 건설 로봇이 스타트업 기업을 중심으로 시장을 형성하고 있는 추세이다.

건설 분야에서 영향력 있는 100대 인물로 선정된 Aarni Heiskanen이 운영하는 AEC Business에서 건설용로봇을 개발하고 상업화한 10개의 대표기업을 선정하였다[7]〈표 1〉. 이를 보면 전통적인 건설 중장비 분야부터 관절 로봇을 활용한 시공, 3D 프린팅 기술을 활용한 건설, 현장 레이아웃(Layout) 로봇까지 기존에 활용이 없었던 새로운 공정이나 분야에 로봇 상용화를 추진하고 있음을 파악할 수 있다.

국내의 경우, 초기투자비용이 큰 로봇산업의 특성상 대형 건설회사 중심으로 건설 로봇 기술이 적용되고 있으며 아래〈표 2〉와 같이 다양한 기술이 도입되어 활용되거나 적용을 검토 중에 있다. 기술적으로는 전통적인 토목장비의 지능화 외에도 최근 3년 내에 새롭게 개발되어 적용되는 기술이 급격하게 증가한 것이 특징이며, 주로 위험작업의 작업자를 대체하거나 현장의 정보를 측정 및 관리하는 관리자를 대체하는 로봇들이 증가하기 시작하였다. 이는 현장의 작업자의 고령화로 인해 반복적이고 위험한 작업을 대체할 수 밖에 없는 시점이며, 현장에서 발생하는 정보 또한 급격하게 증가하고 있으므로 재작업 제거 및 관리효율성 향상을 위해 측량 및 관리 분야 또한 로봇 적용이 시급한 분야임을 보여주고 있다고 할 수 있다. 이 중 가장 건설로봇 개발에 적극적인 기관인 현대건설과 삼성물산은 각각 현대로보틱스와 삼성엔지니어링과 협업하여 건설로봇 기술 개발에 집중하고 있어 해당 회사의 현장을 중심으로 건설로봇 적용이 활성화가 될 것으로 예상되며, 대형건설사의 현장에서 현장 적용성 검증 후 향후 중소형 건설사의 다수의 현장에 확대되어 그 수요가 급격하게 증가할 것으로 기대된다.

표 2. 국내 건설로봇 활용 현황

기업	적용기술	분야
현대건설	다관절 산업용 로봇	용접, 페인팅 작업
	굴삭기 머신가이던스	굴삭기 자동화 및 무인화
	3D프린팅 비정형시공	3D 프린팅 비정형 벤치 제작
	무인 순찰 로봇	현장정보 수집 및 전달
삼성물산	고위험작업 무인로봇	상부천공 자동화
GS건설	4족 보행로봇	현장정보 수집 및 전달, 안전관리
	큐픽스	현장정보 수집 및 전달
대림산업	머신컨트롤	굴삭기 자동화 및 무인화
현대 엔지니어링	AI 미장로봇	미장작업 무인화
	거푸집 제작용 4축 다관절 로봇	3D프린팅 거푸집제작

이 중, 상부천공 자동화를 위한 Smart drilling robot (SDR)은 국내 중소기업인 ㈜빌딩포인트코리아에서 자체 개발한 기술로, 협동로봇, 드릴링 컨트롤, 전용 모빌리티가 결합된 시스템이다〈표 3〉. SDR은 현재 상용화 개발 단계에 있으며, 협동로봇은 별도의 센서없이 6개 축에 내장된 토크센서 값을 활용해 철근배근을 인식하고, 설정된 오프셋(offset) 값만큼 회피해 드릴링하는 것이 특징이다. SDR은 2D 설계도면은 물론 BIM 정보가 포함된 3D 설계도면을 기반으로 드릴링 위치를 자동으로 분류하고 인식할 수 있고, 이를 통해 드릴링 오차를 15mm 내외 수준으로 높임으로써 MEP 모듈의 공장제작, 현장조립과 같은 OSC (Off-Site Construction) 작업이 가능해 생산성을 높이고, 현장 안전성 향상에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

표 3. Smart drilling robot 주요 특징

이미지	주요 Spec.
	· 타공시간 - 콘크리트(50초) - 철근(5~10분) · 드릴비트 - 직경 18mm 비트 기본 (변경 가능) · 타공높이 - 최저(1.5m), 최고(4.2m) · 사용시간 - 연속타공(4시간), 평균(9시간) 사용 가능

6) '2019 국내 협동로봇 시장, 본격적 시장 경쟁구도 형성된다', 인더스트리뉴스, 2019

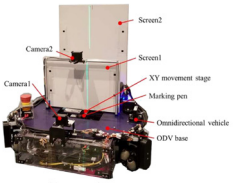
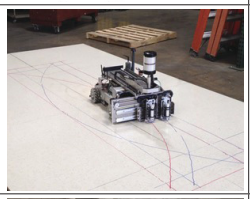
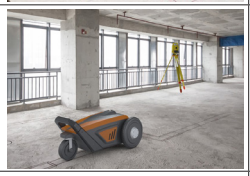
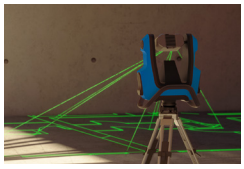
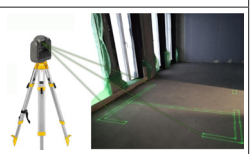
7) https://aec-business.com/10-construction-robotics-companies

3. 로봇 기반 먹매김 시공 자동화 기술 개발

3.1 먹매김 공사 자동화 필요성

건축공사에서 구조체 먹매김(Layout) 작업은 골조공사의 시작으로 골조의 형상 및 치수를 정확하게 만들기 위한 기준이 되는 공사로, 이에 무엇보다 측량에 정확도가 요구되며 바닥에 먹을 매기는 작업 또한 정밀성이 요구되는 중요한 공정이라 할 수 있다. 하지만, 기존 먹매김 작업은 인력에 의한 재래식 방식으로 디지털 도면 정보를 다시 줄자를 통해 수작업으로 변환하여 먹의 정확도가 크게 낮아지는 단점이 있으며, 작업자의 숙련도나 먹줄을 튀기는 과정에 의해 먹의 정확도가 일정하지 않은 문제점이 있다. 또한, 먹매김 프로세스의 정보들이 디지털화되지 못하고 먹도면 작성과 검측보고서 작성과 같이 변환과정이 필요함에 따라 생산성이 낮아지며 정보변환과정의 손실과 이후 공정으로 연계되지 못하는 한계를 가지고 있다. 이에 먹매김 작업의 정밀도와 생

표 4. 먹매김 자동화 기술 개발 현황

구분	업체명(국가)	이미지	기술 특성 및 개발 단계
Robotic layout system	Landor architecture[8] (대한민국)		· 인공지능 알고리즘 탑재된 위치계측기술 기반 로봇으로, 면해석, 치수 및 거리측정, 마킹(marking) 작업 통합 수행 · 현재 프로토타입(prototype) 개발 진행 중
	Takenaka Corporation[9] (일본)		· 레이저 측위장비(laser positioning unit) 및 마킹 로봇(marking robot)을 활용한 프리 액세스 플로어(free access floor)의 격자 라인 먹매김 작업 수행 · 평균 2.3mm 오차 (최대 10.2mm) · 프로토타입 개발 및 실험실 수준 테스트 수행
	DPR Construction[10] (미국)		· RTS(robotic-total-station) 기술 기반의 건식벽체(drywall) 먹매김 작업 수행 · 약 3mm 오차, 직선먹매김 시간당 약 100m 목표 · 2013년 프로젝트 발표 이후 개발 미진행
	Dusty Robotics [11] (미국)		· BIM 모델 연계 건축/구조용 먹매김 작업 수행 · 토탈스테이션-로봇 내 장착된 프리즘 연동을 통한 위치 정밀도 확보 · 약 1.6mm 오차 정밀도 확보 · 시제품 개발 및 현장 테스트 수행
Laser projection system	Mechasys[12] (캐나다)		· 레이저 프로젝터 기반 레이아웃 위치 투영을 통한 건축 (인테리어) 먹매김 작업 대체 · 최대 10m 투영 가능, 3mm 오차정밀도 확보 · 시제품 개발 및 현장 테스트 수행
	Lightyx Inc.[13] (이스라엘)		

8) http://www.landorarchitecture.com/archibot.php
9) Tsuruta T. et al.(2019), Mobile robot for marking free access floors at construction sites, Automation in Construction, 107.
10) https://www.enr.com/articles/8591-jobsite-robot-shows-promise-in-speed-and-accuracy
11) https://www.dustyrobotics.com/
12) https://www.mechasys.ca/
13) https://www.xyht.com/constructionbim/seeing-the-light-lightyx/

산성 향상을 위한 기술 개발이 요구되며, 특히 골조공사 장비의 자동화나 OSC (Off-site construction)공법이 도입되고 적용이 늘어나는 시점에서 먹의 정확도 향상을 위한 먹매김 작업 자동화 및 정보 연계를 위한 디지털화는 필수적이라 판단된다.

3.2 먹매김 자동화 기술개발 현황

건설 현장에서의 먹매김(layout) 자동화 기술 개발이 기존의 대형 건설회사 및 건설자동화 시스템 개발을 목적으로 설립된 스타트업 회사들을 중심으로 추진되고 있다〈표 4〉. 본격적인 기술 개발은 2013년 이후에 추진되었으며, 2020년 이후 시제품의 현장 테스트가 일부 해외 기업에서만 이루어지고 있는 상황이다. 따라서, 현재 먹매김 자동화 기술은 시장 도입기로서 현장의 니즈를 반영한 적정 기술개발 전략의 수립을 바탕으로 적기 시장진입을 통한 경쟁력 확보가 요구된다 할 수 있다.

현장 먹매김 작업의 자동화는 크게 2가지 방식으로 분류할 수 있다. 첫 번째 방식은 스스로 위치를 인식하여 이동하며 먹매김을 수행하는 먹매김 로봇 시스템(robotic layout system)이며, 두 번째는 BIM 모델의 이미지를 표면에 투영하는 레이저 투사 시스템(laser projection system) 개발이다. 작업의 특성상 마킹되거나 투사된 먹매김 선의 위치 정밀도 확보가 매우 중요함에 따라 현재 2가지 방식 모두 3mm 이내의 오차 정밀도 확보가 가능한 제품 개발을 추진하고 있다. 2가지 기술개발 방식 중, 레이저 투사 방식은 위치 정밀도 확보를 위해 한 번에 제공가능한 먹매김 위치 표시 거리에 제약(약 10m)이 있으며, 작업 중 레이저 프로젝터의 오류시 해당 구역의 설치 작업을 진행하지 못하게 되는 한계가 존재한다. 또한 실제 먹매김 작업 자체는 인력이 수행하여야 한다는 측면에서, 스스로 위치를 인식하여 이동하며 먹매김을 수행하는 먹매김 로봇 시스템의 도입을 통한 인력 대체 및 측량, 검측 기술 연계가 요구된다.

이러한 측면에서, 본 고에서는 현재 국토교통부 R&D(국토교통기술촉진연구사업)을 통해 진행되고 있는 '건축물 골조공사 먹매김 시공 자동화 로봇 및 관리플랫폼 개발' 연구 과제[14]를 소개하고자 한다. 본 연구는 4차산업혁명의 핵심기술인 로보틱스 기술(Robotics)과 디지털전환 기술(Digital transformation)을 활용하여 기존의 먹매김 공사의 문제점인 인력기반 재래식 시공공법과 검측방법으로 인한 생산성 및 품질 저하를 근본적으로 해결하는 것을 목표로 한다. 이러한 목표 달성을 위하여 크게 ① 먹매김을 수행하는 로봇, ② 로봇을 제어하는 플랫폼, ③ 검측정보를 관리할 수 있는 디지털 검측관리 시스템에 대한 연구개발을 수행하며, 이를 통해 먹매김 생산성 향상 및 마킹 품질 확보, 검측관리 효율성을 향상시키고자 한다〈그림 1〉.

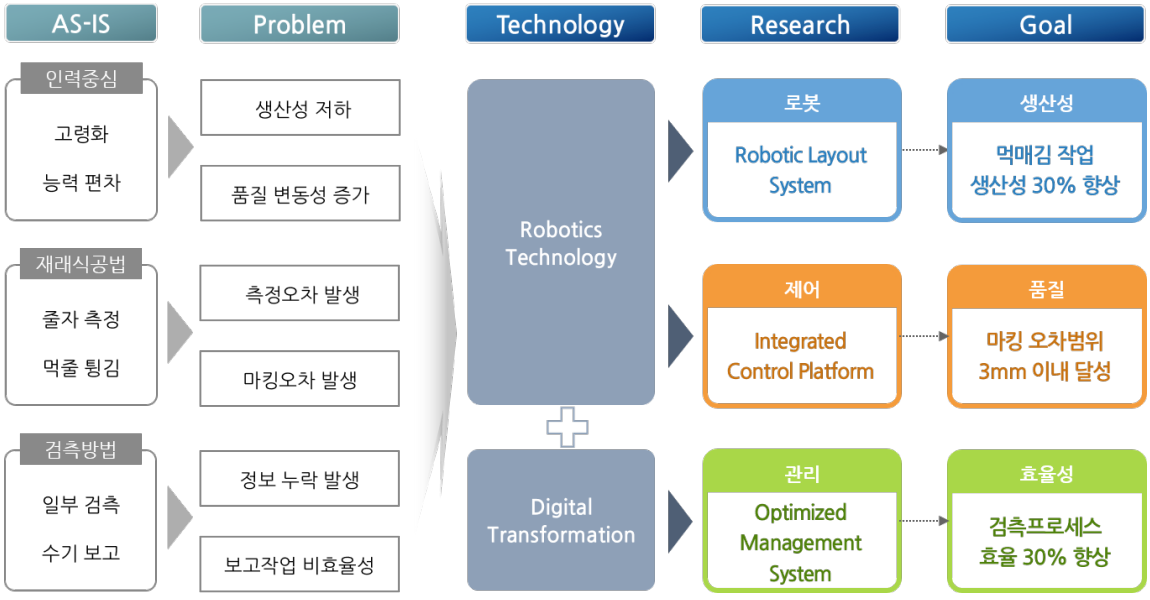


그림 1. 연구개발 개념도

14) 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호:21CTAP-C163790-01)

4. 결언

국내 건설산업의 정부 정책 방향은 4차 산업혁명 및 코로나 시대에 대응하여 첨단기술을 융합한 스마트 건설 기술의 도입을 통한 건설 밸류 체인(value chain) 전반의 기술 혁신을 이룸으로써, 현재 세계 시장에서의 넛크래커(nut-cracker) 위기를 벗어나고, 지식·첨단산업으로의 패러다임 전환을 추진하고 있다. 건설산업의 디지털 혁신은 국내 건설산업의 평준화된 기술경쟁력을 진보시키고 시장에서 선도적 위치를 확보하기 위한 필수적인 방안으로 여겨지고 있다.

특히, 근로자의 고령화, 생산인구 감소, '중대재해 처벌 등에 관한 법률'에 따른 안전관리 강화 등으로 건설현장의 생산방식은 현장에서 생산하는 작업 및 인력을 크게 감소시키는 공법으로 전환될 수 밖에 없으며, 결과적으로 인력을 대체하거나 보조할 로봇과 장비의 도입은 선택이 아닌 필수적인 방안으로 판단된다. 현재 현장에서 요구되는 디지털 정보 기반의 건설로봇들은 우선적으로 단순한 반복작업, 인력 투입이 많은 작업, 유해환경에서의 작업에 우선적으로 요구되고 있다. 앞서 해외 건설로봇 사례에서 보듯이 선도국을 중심으로 이미 해당 분야에 다수의 로봇이 도입, 적용되고 있으며 국내는 이제 중장비를 중심으로 한 자동화에서 단위작업을 수행할 수 있는 로봇을 개발하는 단계로 전환되고 있다. 건설로봇 개발은 초기투자비용이 크기 때문에 선도국과의 기술 격차를 줄이기 위해서는 정부차원의 R&D 예산투입을 통해 산학연이 연계하여 개발하는 것이 필요하고, 로봇을 개발했을 때 실용성과 기대효과가 큰 작업공종이나 분야를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다고 판단된다.

앞서 사례에서 소개한 먹매김 시공자동화 기술은 국토교통부 R&D 사업으로 산학이 협동하여 진행되고 있으며, 해당 연구의 결과물인 먹매김 로봇과 플랫폼을 바탕으로 마감공사 및 인테리어 등으로 확장 가능하여 실용성과 확장성이 충분할 것이라 기대한다. 특히 디지털 설계정보 기반의 건설로봇을 활용한 시공 자동화 및 플랫폼 기술 분야는 현시점에 시장 진입단계이기 때문에 "Fast Follower"가 가능할 경우 "First Mover"로의 역할 수행이 가능하리라 판단된다.