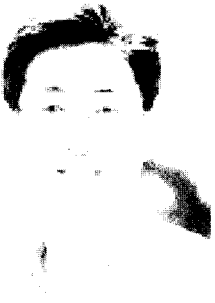


국내외 건설자동화의 연구개발 현황 및 미래 전망

이준복, 홍익대학교 건축공학과 교수



1. 서론

20세기말 컴퓨터 및 정보통신기술의 발달에 힘입어 많은 변화와 새로운 도전의 기대를 가지고 시작된 21세기에 건설산업의 두드러진 변화의 모습은 정보화·지식화·기술집약화·고효율화 등이다. 전통적으로 3D업종인 건설산업은 젊은 기능인력의 기피현상으로 숙련된 기능인력 확보가 더욱 힘들어지고 있는 현실이다. 또한 수요자의 요구에 따른 시설물의 첨단화 및 복잡화되는 추세에 기술력의 확보가 경쟁력의 관건이 되고 있다. 건설시장의 전면 개방으로 기술력을 바탕으로 한 고부가가치 창출이 건설업계의 경쟁력 확보를 위한 지상 목표라 할 수 있다. 건설기술력 향상 분야를 언급할 때 빠지지 않는 항목 중의 하나가 “건설자동화(construction automation)”라고 할 수 있다. 건설자동화를 통하여 작업현장의 안전성을 제고하고 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하기에 언제나 그 중요성이 강조되고 있다. 그러나 기계, 전기, 컴퓨터 등이 포함된 복합기술로서 건설자동화에 대한 전문지식 부족, 건설업의 특성상 연구개발 결과에 대한 불확실성과 이에 따른 위험 부담 등의 복합적인 요인에 의해 자동화의 필요성은 강조되고 있지만 이에 대한 활발한 연구·개발은 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 고에서는 미국, 일본, 유럽에서 지난 20여년간 꾸준히 연구개발을 수행하고 있는 건설자동화분야의 성과를 살펴보고 국내에 있어 건설기술의 발전을 위한 자동화 분야의 미래모습을 전망해보기로 한다.

2. 국내외 건설자동화 연구개발 동향

2.1 건설자동화 개념 및 의의

건설자동화(construction

automation)라 함은 컴퓨터 및 전산기술을 이용한 정보화, 통합관리시스템화 등 소프트웨어적인 기술과 시공의 성력화, 기계화를 위한 자동·반자동 형태의 로봇 개발 등 하드웨어적인 기술을 포함한다. 현재 건설 CALS, CIC 구축 등을 목표로 건설프로세스별(기획, 설계, 시공, 유지관리 등) 업무의 전산화, 프로세스간의 정보의 교류 및 공유를 위한 시스템 구축 등 소프트웨어적인 자동화 분야의 연구·개발이 활성화되고 있으며 이러한 노력으로 공사관리의 효율성 및 투명성이 제고되고, 기술 및 실적자료의 데이터베이스화를 통한 지식의 교류, 공유, 재활용이 이루어지고 있다.

반면, 고소작업 및 중량물 취급 등 열악한 작업환경과 인력 의존도가 높은 건설공사의 근로자 안전문제 및 작업환경 개선과 생산성 정체 문제 등을 해결하기 위한 방안으로 인력지원 또는 인력대체 하드웨어적인 건설자동화 분야가 있다. 이와 같은 건설자동화는 원격조종, 통신, 수치제어 등 콘트롤, 다양한 센서에 의한 자료수집 등의 기능을 포함한 인력대체형(robotic) 또는 인력과 장비가 협력하는 형태(man-machine interface)의 건설장비 개발을 의미하고 있으며, 개발된 장비는 건설자동화장비 또는 건설로봇이라고 한다. 본 고에서는 현장에서 활용가능한 장비 등의 하드웨어적 자동화기술에 대하여 논의하고자 한다.

건설자동화는 1980년대 후반부터 일본, 미국, 유럽에서 부분적으로 진행되었으며 그 실적도 상당수 보고되고 있다. 일본은 미장용 로봇과 같은 개별 공정에 대한 로봇화, 무인화의 연구와 동시에 대형 건설회사에서 공장식 자동화시스템의 개발·적용을 통하여 도심에서의 전자동 고층 건축물 구축도 실시하여 건설자동화의 가능성을 보여 주었다. 미국은 우주개발 프로젝트와 같은 국가적 대형 프로젝트의 구성요소로서 건설용 로봇을 개발하는 등

꾸준한 연구·개발을 이루었다. 유럽에서도 조적, 굴착, 미장 등 개별 공종에 대한 로봇의 연구·개발이 진행되고 있다.

산업용 로봇이 반복작업을 기계화하고자 하는 목적으로 매니퓰레이터(manipulator)를 개발하는 것으로부터 시작되었고, 이에 인공지능 등 첨단기술의 접목을 통하여 현재 고도의 지능형 로봇의 개발에 관한 연구가 진행 중에 있다. 건설산업에서의 로봇개발은 아직 초보적인 단계로서 인간과 장비와의 공동작업 형태 또는 원격조종형 로봇의 형태인 매니퓰레이터의 개발단계로 판단된다. 건설자동화장비 또는 건설로봇의 구성은 본체, 매니퓰레이터, 말단기기(end-effector) 등의 구동부, 조종, 피드백, 수치제어 등의 제어부, 시각, 촉각 등을 통한 감지능력의 센싱부의 요소기술로 이루어지고 있다.

하드웨어적인 건설자동화분야의 연구·개발은 이와 같은 복합적인 요소기술이 요구되고 있으며, 실물규모(full scale)의 현장 적용 가능시스템의 구축을 통한 타당성 분석을 실시하여야 하기에 학제적(multi-disciplinary) 및 다양한 전문가로 이루어진 산학연 공동조직 형태의 연구·개발팀의 구성·운영이 필수적이라 사료된다.

2.2 국내 동향

국내에서는 1980-1990년대에 한국건설기술연구원에서 건설자동화의 필요성 및 적용대상 공사 선정을 위한 이론적인 연구를 수행하였다. 또한 진동롤러의 자동화, 타워크레인의 반자동화 연구 등 현장 적용을 위한 기존장비의 자동화 방안 연구를 수행하였다. 건설기업 및 관련 연구기관에서 일본에서 개발된 미장로봇을 도입하여 국내에 적용한 사례 발표도 있었고 거푸집 자동화 공법도 소개되었다. 최근 미장로봇의 국내개발이 성공적으로 수행되었고 교량유지관리를 위한 교량하부 안전 점검용 로봇이 개발되어 활용되고 있

다. 또한, 흙관매설 자동화 장비의 연구개발이 진행 중에 있으며 도로면 유지보수를 위한 크랙실러의 개발에 관한 연구, GPS와 머신비전(machine vision)을 활용한 타워크레인 작업 효율성 향상에 관한 연구, 기성 콘크리트 말뚝의 두부정리 자동화 방안에 대한 연구도 착수되었다.

이와 같이 국내의 경우 과거 20여년에 걸쳐 건설 자동화 기술개발에 많은 연구노력을 기울여 왔던 미국, 일본, 유럽의 R&D 투자 규모, 로봇 개발 및 상용화 건수에 비교해 볼 때 그 수준은 매우 미약하다고 볼 수 있으나 국내에서도 안전, 생산성 문제, 경제성 확보, 품질향상을 위해 자동화 분야의 연구개발이 간헐적으로 진행되어 왔으며 최근 건설 및 메카트로닉스 전문가 집단을 중심으로 건설 자동화 기술개발에 관한 연구가 다시 활기를 찾고 있는 모습이다.

2.3 국외 동향

지금까지 건설자동화 연구는 북미, 일본, 유럽을 중심으로 기술개발이 이루어져 왔다고 볼 수 있다. 이는 국제 건설자동화 협회인 IAARC (International Association for Automation and Robotics in Construction)에서 매년 개최하고 있는 ISARC (International Symposium on Automation and Robotics in Construction) 컨퍼런스에 발표된 북미, 일본, 유럽 및 기타 지역의 논문 게재 편수를 살펴보면 건설자동화 분야의 지역별 기술개발 현황을 간접적으로 파악할 수 있다.(그림 1).

국외에서 지금까지 연구개발된 자동화 분야는 다음 표 1과 같이 요약할 수 있다. 즉, 단일작업용 장비의 개발 및

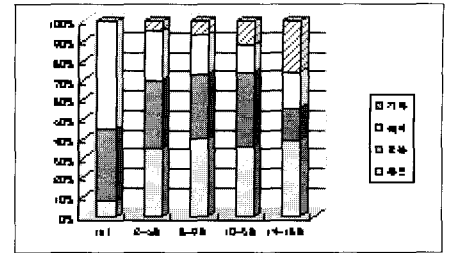


그림 1. 북미, 일본, 유럽의 건설자동화 로봇 기술 개발 현황(1984년-2001년)

기존장비의 첨단화에 주력하였으며, 터널, 토공 및 건축물시공의 자동화시스템 구축에 성과를 보이고 있다.

(1) 미국

미국은 1980년대부터 20여년 동안 건설자동화 분야의 연구개발이 이루어지고 있다. 초기 건설자동화 분야의 연구개발에 가장 큰 장애요인으로 보여졌던 노동조합(labor union)의 부정적 시각도 이제는 많이 달라지고 있다(Skibniewski 2000). 즉, 건설로봇과 같은 인력대체 장비의 개발이 단순히 현 노무인력의 직업을 빼앗을 수도 있다는 부정적인 시각에

표 1. 건설자동화 개발 분야

형태	직업	개발 장비
단일작업용	토공	screeding
		grading
		excavating
	철근조립	rebar production
		rebar installation
	콘크리트 타설	automated concrete distribution
	조적공사	brick/block masonry
	내외 마감/설치	board installation
		floor finishing
		welding/connecting
		tiling
		exterior wall installation
	도장	exterior painting
		interior wall painting
		fireproofing/steel painting
중량물 취급	crane control	
	material handling	
검측용	quality control	
	tile inspection	
	exterior wall inspection	
	load balancing	
시스템	터널	tunneling
	무인토공장비	autonomous earthwork system
	전자동시공시스템	ABCS 외 다수

서 개발 장비가 궁극적으로 인명피해를 줄일 수 있고 human-robot collaboration interface로의 접근이 가능하며 이는 결국 노무자의 작업환경 개선, 숙련도, 기술력 등을 향상시킬 수 있다는 긍정적인 시각으로 전환된 것을 의미한다.

그림 2는 최근 국립표준국(NIST)에서 개발된 크레인의 양중능력 증진을 위한 자동화 기술이다. 즉, 철틀부재와 같은 중량물의 운반 및 인양을 위하여 개발된 로보크레인은 첨단 IT기술을 접목한 자동화 기술이다. 유선 케이블로 구성된 매니퓰레이터에 장착된 레이저 센서에 의해 부재의 위치 및 자세(location and posture)를 결정하게 된다. 경로계획 프로그램에 의해 부재의 픽업 및 운반행위를 자동으로 제어하게 된다. 또한, 장애물이 있을 경우 이를 감지하고 피해가는 기능까지 추가되어 진보된 로봇으로의 발전을 도모하고 있다.

개발 로봇 또한 첨단 컴퓨터 및 전자통신기술(wireless sensors, micro and nano-technology)의 급속한 발달에 힘입어 보다 정밀하고 소형화되는 추세이다. 미국에서는 우주항공국(NASA) 및 국립표준국(NIST) 등 국가 연구기관 및 몇몇 대학교에서 이러한 건설 자동화 연구를 주도하고 있는 실정이며 주요 연구개발 항목은 다음과 같이 요약되어질 수 있다.



그림 2. NIST의 RoboCrane

- 자동화 토공 장비의 개발(그림 3)
- 위험 작업환경에서의 이동 및 작업가능 로봇 개발
- 자재의 취급 및 인양을 위한 원칙(full-scale)의 다목적 매니퓰레이터 개발
- 도로면 및 교량 유지보수 자동화 로봇개발
- 인간공학적 작업개선을 위한 도구 및 장비의 개발
- 우주개발을 위한 자동화기술 개발 및 우주탐사 로봇개발 프로그램

이와 같은 연구개발은 관련 핵심기술(core technology)의 급속한 진전 즉, 소형화기술(micro and nano technology), 센싱기술(vision, microwave and ultrasonic 등), 통신기술(wireless communication, GIS, GPS, PDA 등)의 기술진보가 있었기에 가능하였으며 현재 그 개발속도는 더욱 빨라지고 있는 실정이다.

(2) 일본

1970년대 후반부터 시작한 일본의 건설자동화 연구는 이미 오래전부터 제조업에서 자동화시스템의 개발, 적용을 통한 안전 및 생산성에 획기적인 성과를 보였고 핵심기술 또한 보유하고 있다고 판단하였기에 미국이나 서구 유럽과는 형태가 다른 대기업(big 5) 중심의 보다 적극적인 자동화 기술개발이 이루어져 왔으며 민간

기술이전을 통해 단기간에 많은 개발 실적을 보여 왔다. 일본 건설산업의 경우 지금까지 다양한 건설자동화 로봇이 연구 개발되어 현장에 적용되고 상용화되어 왔으나 대표적인 자동화 연구개발 실적은 다음과 같다.

- 전자동 고층 건축물 구축시스템(Roof push-up, SMART, T-up, ABCS 등) 개발
- 터널굴착시스템 개발
- 콘크리트 마감 및 면 처리 로봇개발
- 무인 원격조종 토공 자동시스템 개발(그림 4)

앞서 언급된 바와 같이, 일본의 고층건물 건설의 자동화시공시스템의 개발 사례는 1차적으로 수요에 의해 산물이 결정되었으며 이와 관련한 핵심 요소기술(core



그림 4. 일본 Fujita 건설의 무인시공자동화 시스템(unmanned tele-earth work system)

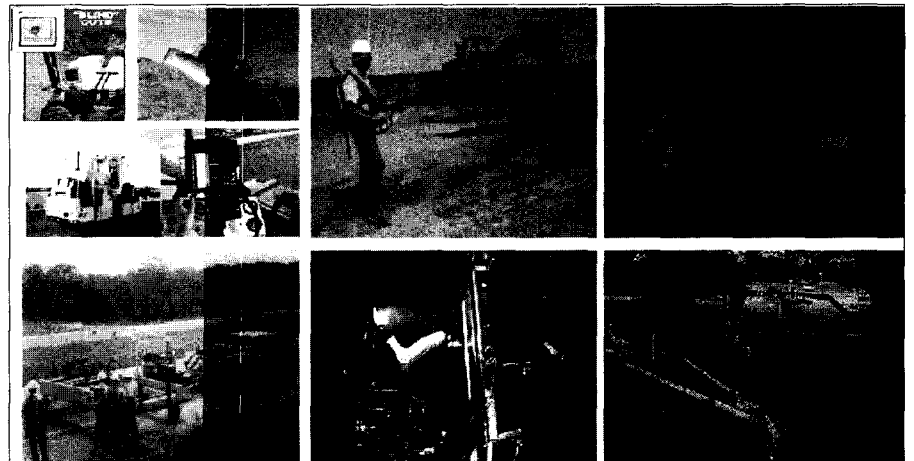


그림 3. 미국에서 개발된 주요 건설 자동화 장비

enabling technologies)은 공동작업을 통해 산학연 협동연구회에서 도출하였다. 이와 같은 상태에서 각 기업들은 최종 산물을 구체화하는 과정을 독자적으로 추진하였고 그 결과 1990년대에 다수의 유사한 기술개발을 이룩하게 되었다. 협동연구를 통한 최종 산물 및 핵심요소기술의 도출은 막대한 사업예산이 투입되는 연구개발에 대한 각 기업들의 위험부담을 경감시키는 효과가 있다고 할 수 있다. 실제로 이를 통하여 건설 프로젝트 생산 체계의 개선, 노동생산성 향상, 전천후 시공가능 등 작업환경의 개선, 인여자재의 감소 등 많은 효과를 보았다고 보고되고 있다. 전체적인 개념이 기존의 건설형태에서 제조업 공장자동화(factory automation)의 개념을 도입하였다는 점에서 창의적인 발상의 전환이 있었으며 건설산업에 주는 시사점 또한 크다고 할 수 있다. 그림 5는 일본 대성건설에서 개발 시공한 Big Canopy의 구성도이다.

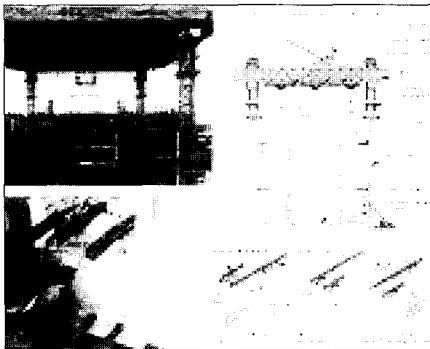


그림 5. big canopy 자동화 시스템

새로운 개념의 자동화시스템을 도입함으로써 건설 작업환경의 개선 및 안전도를 향상시키게 되었으며, 외부의 기후환경에 영향을 받지 않는 전천후 공사가 가능하게 되었다. 또한, 공장자동화(factory automation)의 개념을 도입하여 개별 자동화로봇의 이동문제를 해결하게 되었으며 생산성 향상을 도모하게 되었고 건설 자재의 낭비를 획기적으로 감소시키는 결과를 도출하였다. 또한 전자동 고층 건축

물 구축 시스템을 비롯한 다양한 건설로봇의 성공적 개발을 통하여 최근 일본에서는 여전히 21세기를 선도할 건설기술로 자동화기술을 포함하고 있다. 지금까지의 기술개발을 통하여 얻어진 경험을 토대로 앞으로 해결해야할 과제(Hasegawa 2000)를 다음과 같이 제시하고 있다.

- 시공작업의 개선: 설계와 시공 프로세스의 연계 및 정보의 통합, 공업화 건축 및 표준화를 통한 건설로봇의 적용성 확대
- 건설산업 구조의 재조명: 실제 시공을 담당하는 영세한 하도급업체 들의 기술개발 유도를 통한 기술력 확보
- 새로운 혁신기술의 원칙활용 (full scale utilization): 무선 인터넷 및 무선 정보통신 기술, GPS, GIS, CAD와 각종 컴퓨터 시뮬레이션 (computer-aided simulation) 기술 등 오늘날 급속도로 발전하고 있는 첨단 혁신기술을 건설산업에 적극 활용하여 건설자동화 분야의 시장성 확대

(3) 유럽

유럽에서는 주택건축을 위한 조적로봇의 개발, 타워크레인의 자동화 등 단일 공종에 적합한 로봇의 개발을 제조업의 CIM 개념을 이해하면서 주목시키려는 노력을 경주하고 있다(Balaguer 2000). 또한, 하수관 점검 및 유지보수 마이크로 터널링과 같은 trenchless technologies에 많은 관심을 가지고 연구개발을 수행하고 있다. (그림 6 참조)

유럽에서는 개발된 각종 건설로봇 및 자동화장비가 활용되지 못하는 이유를 다음과 같이 분석하고 있다.

- 로봇 도입에 의해 파생되는 높은 추가 비용
- 로봇 조종 장치의 복잡한 기능
- 로봇작업의 편의를 위한 특별한 자재의 사용 및 로봇의 원활한 작업수행

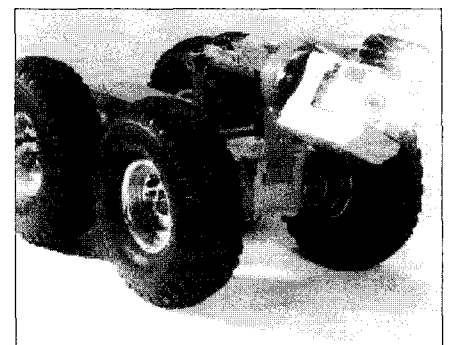
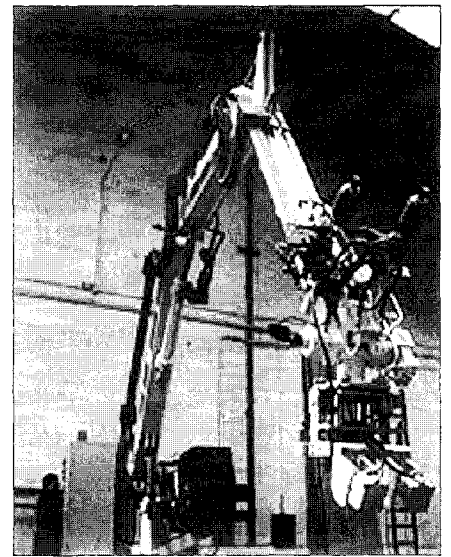


그림 6. 독일에서 개발된 조적 로봇 ROCCO

을 위한 연속적 자재 공급의 문제 이러한 문제를 해결하기 위해서는 작업 프로세스의 개선, 대량생산(mass production)을 위한 부재의 표준화, 단순하면서 정밀한 로봇조종 장치의 개발이 요구된다고 분석하고 있다.

3. 건설자동화의 미래

세계 로봇협회에서 건설용 로봇에 대한 구체적인 수요에 대한 전망치는 발표된 것이 없으나 전체 로봇산업의 수요규모는 1999년 742,500대에서 2003년에는 892,200대로 증가(20.2%)할 것으로 전망하고 있다. 또한 산업용 로봇의 개발에 가장 앞서 있는 일본의 일본로봇공업협회에서는 2005년에는 제조업용 로봇의 수요를 비제조업용 로봇이 능가할 것으로 전망하고 있다. 비제조업분야 중 건설분야가 약 1000억엔(약 1조원) 정도로 일본 전체의 로봇시장의 10%규모에 해당될 것으로 전망하고 있다. 이는 열악한 건설환경의 작업조건 개선, 숙련공의 부족, 인건비의 상승, 대형화/복합화되는 건설물의 요구에 적극적으로 대응하기 위한 기술적 접근으로서 건설용 로봇의 필요성이 대두되기 때문으로 해석된다.

건설자동화 연구개발 분야는 다음과 같은 단계로 발전될 것으로 예상된다. 첫째, 단일작업을 위한 MMI(man-machine interface) 장비의 연구개발이 진행될 것이다. 이미 언급하였듯이 인력의존도가 높은 만큼 안전문제의 발생 가능성 증대, 인건비 상승에 따른 생산성 저하, 열악한 작업환경으로 인한 기피현상의 급증 등 현실적인 문제를 해결하기 위한 인력보조 및 인력대체용 자동화 장비의 개발이 활발히 진행될 것으로 전망된다. 이는 기존 장비의 기능향상도 포함될 것이다.

둘째, 고공, 해저, 사막, 오염된 지역 등과 같은 일상적인 작업이 어려운 환경하에서 인력을 대체할 수 있는 원격조종 혹은 자동화 장비의 개발이 진행될 것이다. 이는 자동화 장비를 구성하고 있는 핵심요소 기술인 센싱 및 제어기술의 발전에 따라 개발속도가 빨라질 것으로 기대된다.

셋째, 신공간 창출을 위한 혁신적 자동화 장비의 개발이 이루어질 것이다. 즉, 미국에서 추진하고 있는 space development program, 일본에서 관심있는 인공섬 개발 및 해저도시 개발 등과 거대한 프로젝트를 수행하기 위한 지능적인 로봇의 개발이 이루어 질 것이다.

4. 결론

급변하는 건설환경에서의 건설산업에 오랫동안 내재해 있는 안전, 생산성, 품질 문제의 해결, 세계화 및 무한경쟁시장에서의 기술경쟁력 확보, 대형화·복합화되고 있는 건설수요에 대한 적극적 기술대응 방안, 우주개발 및 지하개발 등 새로운 도전이 예측되는 미래건설 선도형 기술로서 건설자동화의 필요성이 강조되고 있다. 이미 20여년 이 분야에서 꾸준히 성과를 보이고 있는 일본, 미국, 유럽의 발전과정과 성과를 살펴보았다. 우리의 현실을 인식하고 기술혁신을 통한 기술경쟁력 확보를 하기 위한 방안으로서 건설자동화를 재조명하고자 한다. 결론적으로 건설자동화 분야의 미래발전을 위한 몇 가지 제언을 하면 다음과 같다.

첫째, 건설행위가 이루어지고 있는 현장중심의 안전, 품질, 생산성, 경제성에 영향을 미치는 요인이 무엇인지, 이와 같은 문제를 해소할 수 있는 기술적 해결책은 무엇인지를 파악하기 위해 우선 상향식(bottom-up) 수요의 파악이 이루어져야 한다. 이는 파악된 현실적인 문제를 해결하기 위한 접근법이 있을 수 있고, 보다 효율적이고 생산적인 생산시스템의 구축을 위한 기술선도형 접근방법이 있을 수 있다.

둘째, 이와 같은 수요의 파악에 따른 마스터 플랜의 작성이 요구된다. 작성된 마

스터 플랜을 기반으로 중장기적 안목에서는 각계 전문가들이 함께 기술적 로드맵(technology roadmap)과 세부 실천계획(implementation plan)을 작성하여야 한다. 이에 따른 중장기 목표가 명확히 설정될 수 있을 것이며 체계적이고 효율적인 투자 및 연구개발 계획이 수립될 것이다.

셋째, 건설자동화 연구개발 활성화를 위한 성공적 단기 성과의 기술적 노후우축적이 필요하다. 수요조사 결과 파악된 수요와 기술이 결합된 단일작업을 위한 자동화기술의 성공적 연구개발 성과를 기술적 노후우로 집적하여야 한다. 이를 토대로 다목적(multi-purpose) 복합 자동화기술의 연구개발이 성공적으로 진행될 수 있다.

넷째, 막대한 투자비와 기간의 경감, 높은 위험부담의 분산을 위하여 다양한 전문가의 협력체계(inter-disciplinary cooperation)가 필요하고 이를 위한 산학연 공동협력체계를 구축하여야 한다.

다섯째, 기술혁신의 주체는 궁극적으로 그 기술의 최종 사용자가 될 건설기업이다. 따라서, 건설자동화의 필요성은 인식하면서도 상대적으로 높은 위험부담과 가시적 성과의 확실부족으로 말미암아 투자 및 참여를 기피하고 있는 민간부문을 적극적으로 유도할 수 있는 범국가적 차원에서 다각적인 방안이 강구되어야 한다.

전세계 건설산업에서 현재 우리나라의 위상은 선진국과 개발도상국 사이 정도라 생각된다. 건설선진화를 위하여 많은 분야에 있어서 노력하고 있다. 특히, IT기술을 활용한 정보화, 지식화, 첨단화를 위한 많은 노력이 경주되고 있는 현실에서 건설현장에서 적용가능한 건설자동화 기술을 통하여 기술경쟁력을 확보하고 나아가 잠재되어 있는 시공의 무한한 가능성을 실현시킬 수 있기를 기대한다.