

Research Paper

건축물 골조공사 먹매김 시공자동화 로봇 프로토타입 개발

Development of an Automated Layout Robot for Building Structures

박규선¹ · 김태훈^{2*} · 임현수³ · 오종현⁴ · 조규만⁵

Park, Gyuseon¹ · Kim, Taehoon^{2*} · Lim, Hyunsu³ · Oh, Jhonghyun⁴ · Cho, Kyuman⁵

¹Master's Course, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju, 61452, Korea

²Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju, 61452, Korea

³Assistant Professor, Department of Architecture, Soonchunhyang University, Asan-si, Chungcheongnam-do, 25601, Korea

⁴Principal Research Engineer, R&D Team, Geosystems Inc., Mapo-gu, Seoul, 04092, Korea

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju, 61452, Korea

*Corresponding author

Kim, Taehoon

Tel : 82-62-230-7145

E-mail :

toonkim@chosun.ac.kr

Received : November 13, 2022

Revised : November 22, 2022

Accepted : November 24, 2022

ABSTRACT

Layout work for building structures requires high precision to construct structural elements in the correct location. However, the accuracy and precision of the layout position are affected by the worker's skill, and productivity can be reduced when there is information loss and error. To solve this problem, it is necessary to automate the overall layout operation and introduce information technology, and layout process automation using construction robots can be an effective means of doing this. This study develops a prototype of an automated layout robot for building structures and evaluates its basic performance. The developed robot is largely composed of driving, marking, sensing, and control units, and is designed to enable various driving methods, and movement and rotation of the marking unit in consideration of the environment on structural work. The driving and marking performance experiments showed satisfactory performance in terms of driving distance error and marking quality, while the need for improvement in terms of some driving methods and marking precision was confirmed. Based on the results of this study, we intend to continuously improve the robot's performance and establish an automation system for overall layout work process.

Keywords : layout work for building structures, construction robotics, construction automation

1. 서론

건설 산업은 생산성의 정체, 노동력 부족 및 고령화 등의 문제점을 겪고 있으며 이러한 문제점을 극복하는 방안으로 자동화 기술 도입을 시도하고 있다[1]. 건설 자동화는 최근 건설장비의 무인화, 3D 프린팅, 건설 로봇에 이르기까지 건설 현장의 생산성과 안전성을 향상시키기 위해 여러 방향으로 개발이 진행되고 있다[2]. 이중 건설 로봇을 통한 시공 자동화는 단순 반복적 특성을 갖거나 높은 정밀도를 요구하는 작업 등에서 인력을 대체하여 생산성 및 품질 향상에 기여할 수 있다[3].

건축공사에서 먹매김 작업은 기초, 기둥, 옹벽 등 다양한 건물의 구성 요소를 계획된 위치에 정확히 형성하기 위한 작업으로 전체 건축물의 품질을 좌우하는 중요 공정이다. 하지만, 인력에 의존한 기존 방식은 먹매김 과정에서 작업자의 숙련도에 따라 먹 선의 위치의 정확도가 떨어지거나 일정하지 않은 한계를 가지고 있다. 또한 먹매김 정보들이 디지털화되지 못해 먹도면, 검측 보고서 작성 등의 변환 과정에서 정보 손실과 오류가 발생하며, 그에 따른 후속 공정으로의 정보 연계성 및 생산성 저하 문제점을 가지고 있다.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

떡매김 작업은 공사 진행에 따라 반복적으로 수행되어야 하며 높은 정밀도를 요구한다는 측면에서 로봇을 이용한 자동화 기술 도입 효과가 큰 작업 중 하나이다. 이에 최근 일부 해외 건설사 및 건설자동화 회사에서 떡매김 자동화 기술 개발이 이루어져 실험실 또는 현장 테스트 단계이나[4-6], 마킹 정밀도 확보를 위해 마감 공정을 대상으로 실내 환경에서 운영되는 한계를 지닌다. 즉, 건축물 골조공사를 대상으로 한 떡매김 자동화 기술 개발 사례는 없다고 할 수 있다. 하지만, 가장 선행되는 건축물 골조 공사에서의 떡매김 작업 중요도 및 자동화 필요성은 더욱 크다고 볼 수 있으며, 이에 최근 국내에서 건축물 골조 공사용 떡매김 시공 자동화 시스템 개발이 추진되고 있다[7]. 해당 연구는 떡매김 작업뿐 아니라 사전 준비단계에서부터 검측 단계까지의 자동화 및 정보화를 위한 떡매김 로봇 및 관리플랫폼 개발을 포함한다.

본 연구는 건축물 골조 공사의 떡매김 시공 자동화 시스템에 있어 핵심 기술인 떡매김 자동화 로봇의 프로토타입 개발 과정을 소개하고 기초성능을 평가하여 향후 연구 및 개선 방향을 제시하고자 한다. 이를 위하여 우선 골조 공사용 떡매김 시공 자동화 시스템 개발 방향 및 요구사항과 관련한 기존 문헌 결과를 토대로 개발 중인 자동화 시스템의 요소기술 및 운영 절차를 제시한다. 이를 바탕으로 떡매김 자동화 로봇의 설계 및 구성, 제작된 프로토타입의 하드웨어적 성능 분석을 수행한다 (Figure 1 참조).

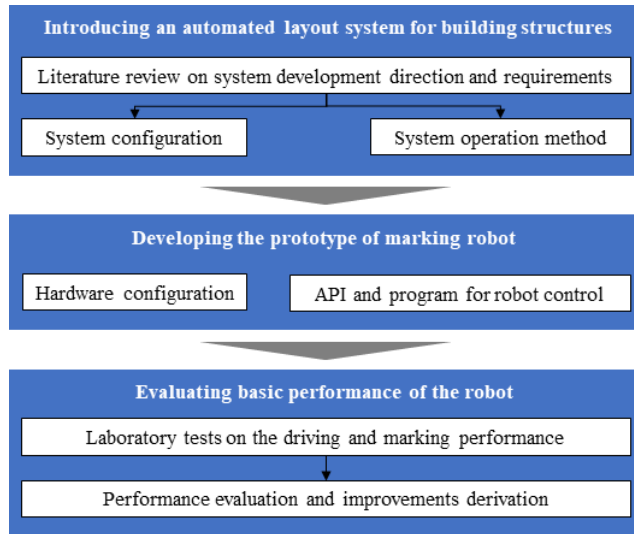


Figure 1. Research procedure

2. 떡매김 시공 자동화 시스템 구성 및 운영 절차

Lim et al.[7]의 연구에서는 기존 유사 시스템의 목적 및 구성 기술을 파악한 후, 건축물 골조 공사용 떡매김 자동화 시스템의 필요 요소기술과 우선순위를 제시하였다. 또한, Kim et al.[8]의 연구에서는 체계적인 설계 방법론을 활용하여 골조 공사 떡매김 자동화를 위한 로봇의 개념 설계안을 제시하였다. 본 절에서는 기존 연구 결과를 토대로 하여 개발 중인 떡매김 자동화 시스템의 전반적인 구성 및 운영 절차를 제시한다.

2.1 떡매김 시공 자동화 시스템 구성

개발 중인 골조 공사용 떡매김 시공 자동화 시스템은 떡매김을 위한 사전 준비단계에서부터 떡매김 및 검측 단계까지의 전반적인 떡매김 관련 공정의 자동화 및 정보화를 목표로 한다. 이를 위해 단계별로 다음과 같은 요소기술로 구성된다.

2.1.1 사전 준비단계

떡매김을 위한 사전 준비 단계에서는 기존 골조도면으로부터 떡매김 작업에 필요한 마킹(marking) 위치와 종류, 마킹순서 및 이동 경로 정보를 생성하여 떡매김 로봇에 전달해주기 위한 기술이 요구된다. 이에 골조도면으로부터 떡도면을 생성하기 위한 1) 떡도면 자동 생성 기술, 로봇의 마킹작업순서 및 이동 경로를 최적화하기 위한 2) 최적 이동 경로 생성 기술, 도면 좌표를 현장과 일치시키기 위한 3) 도면-현장 맵핑(mapping)기술로 구성된다.

떡도면 자동생성기술의 경우, 우선 골조도면으로부터 떡매김을 위한 해당 층의 벽체와 기둥, 바닥 객체 요소만을 추출한다. 기존 인력에 의한 떡매김 작업 시에는 떡도면 생성 과정에서 실무자의 경험에 의존하여 기존 떡 생성 및 기존 떡으로부터 떡매김 위치까지의 거리 표시 등이 필요하여 시간 소요가 크나, 떡매김 자동화를 통해 별도의 기존 떡 생성이 필요 없게 됨에 따라 해당 과정 소요 시간을 상당히 단축할 수 있다. 이후 구조부별 설정된 피복두께 및 보정 가능 오차 정보를 입력한다. 이 과정은 실제 로봇에 의한 떡매김 단계에서 골조 공사의 철근 시공 오차를 반영하여 마킹위치를 자동 보정하기 위한 선행 작업이다. 마지막으로 로봇에 의한 마킹 포인트를 생성한다. 이는 개발된 떡매김 로봇의 정지 후 마킹 작업방식에 의해 요구되는 작업으로, 로봇의 1회 마킹 거리를 고려하여 떡도면 내 마킹 포인트를 생성하게 된다.

최적 이동 경로 생성 기술은 생성된 떡도면과 마킹 포인트를 기준으로 떡매김 로봇의 표시작업순서와 이동 경로를 생성하고 최적화하여 떡매김 작업 시간을 최소화하기 위해 요구된다. 이를 위해 우선 로봇의 크기와 회전반경을 고려하여 이동 지점을 생성하고, 로봇의 주행방식(직선 주행, 사선 주행, 제자리 회전)과 속도, 회전 방향 및 시간을 토대로 지점별 이동시간을 산정한 후, 최적화 알고리즘을 통해 전체 로봇의 이동시간을 최소화할 수 있는 작업순서를 도출하게 된다[9].

도면-현장 맵핑 기술은 생성된 떡도면과 실제 로봇의 작업이 수행될 현장과의 좌표를 일치시키기 위한 것으로, 떡매김 로봇의 실시간 위치를 파악하기 위한 토달스테이션(total station)에서 측정되는 좌표를 설계좌표계(떡도면 좌표)로 변환하는 과정이다. 좌표 변환을 위해서는 축척 변화(scaling), 좌표축 회전(rotation), 평행이동(translation)의 3개 과정이 요구되며, 현장 내 측정이 용이한 위치에 토달스테이션과 2점 또는 3점의 기준점을 설치한 후 기준점 좌표를 산출하고 3차원 좌표 변환으로 캘리브레이션(calibration)을 수행하게 된다.

2.1.2 떡매김 단계

떡매김 단계에서는 해당 작업의 자동화를 위한 요소기술로써, 골조 공사 환경에 대응하여 원활한 작업 수행이 가능한 1) 로봇 주행 및 마킹 기술, 로봇의 이동 및 마킹 위치를 제어하고 모니터링하기 위한 2) 로봇 제어플랫폼 기술, 골조 공사의 시공 오차를 반영하여 마킹 위치를 보정하기 위한 3) 철근 위치오차 측정 및 보정 기술로 구성된다.

로봇 주행 및 마킹 기술의 경우, 기존 인력 떡매김 방식과 동등 이상의 작업 시간 및 3mm 이내의 마킹 오차 확보를 목적으로 한다. 이에 우선 골조 공사 환경상 바닥 면의 평활도가 제대로 확보되지 않는 조건에서 마킹 정밀도를 확보하기 위하여 로봇을 우선 해당 작업 위치로 이동시킨 후 정지한 상태에서 일정 길이의 선을 마킹하는 방식으로 운영된다. 이때 이동 위치 정밀도가 다소 떨어지더라도 마킹 정밀도를 높이기 위하여 마킹 장치 자체의 일정 거리 및 각도 회전이 가능하도록 설계된다. 또한, 주행부는 골조 공사 환경에서 원활하고 효율적인 이동이 가능하도록 바퀴의 회전 및 조향이 동시에 가능한 구동 시스템을 적용한다. 이를 통해 로봇의 이동속도를 향상시킴과 동시에 마킹 정밀도를 확보할 수 있다. 마킹 장치의 경우 마킹 품질 및 장치 간소화를 위해 별도의 잉크 공급장치 없이 바닥에서부터 일정 거리를 유지하며 잉크 카트리리지로부터 직접 분사가 가능한 비접촉식 마킹 시스템을 채택하고, 골조 공사 떡매김 작업 특성상 다양한 색이나 문자마킹은 배제한다. 또한 골조 공사 떡매김 작업을 위해 마킹부를 로봇의 측면부에 돌출시키고, 한 축에만 설치하여 로봇의 움직임을 한 방향으로 제한하도록 한다.

로봇 제어플랫폼 기술은 사전에 입력된 로봇의 작업순서와 좌표계에 따라 해당 위치로 정밀하게 로봇을 이동시키고 마킹 작업을 제어하며 상태를 모니터링하기 위해 요구된다. 우선 로봇의 크기와 방향, 작업순서에 따라 다음 작업 위치까지의 이동방식을 결정하며, 현장 내 고정된 위치에 설치된 토달스테이션으로부터 로봇 상부에 부착된 프리즘(prism) 타겟을 추적하여 실시간

로봇의 위치 좌표를 취득한다. 이후 정지한 상태에서 프리즘을 로봇 내부에서 3방향으로 이동시켜 각 위치정보를 취득한 후 좌표 변환 알고리즘을 통해 로봇의 방향, 기울기를 포함한 정밀자세 확인을 수행한다. 이러한 과정을 통해 취득된 정보를 토대로 로봇의 정지 위치로부터 마킹지점까지의 위치를 계산하여 마킹 장치의 정밀 이동 및 설정된 길이만큼의 분사 제어를 수행한다.

철근 위치오차 측정 및 보정 기술은 현장에서의 철근배근 시공 오차를 반영하여 먹선의 위치 보정을 자동화하기 위한 기술이다. 이를 위해 2D 라이다(LiDAR) 센서를 활용하여 로봇이 정지한 상태에서 해당 구간의 철근 위치를 파악하고 지정된 먹선 위치와의 거리를 계산한다. 이후 해당 부분 구조체에 설정된 피복두께와 허용오차기준과의 비교를 통해 먹선 보정 여부를 판단하게 된다[10].

2.1.3 검측 단계

검측 단계에서는 로봇에 의해 수행된 먹매김 위치의 오차를 측정하고 검측 보고서를 자동으로 생성하기 위한 기술로 구성된다. 이를 위하여 설계 도면에서 검측 위치를 설정하고 현장에 설치된 토탈스테이션을 이용하여 설정된 검측 위치로 자동 시준 한 후 실제 마킹된 위치로 조정하여 측정한다. 이를 통해 설계상 마킹 위치와 실제 마킹 위치오차를 확인할 수 있으며, 해당 층의 검측 위치와 오차 데이터를 포함한 전체 검측 결과 보고서를 생성하게 된다.

2.2 먹매김 시공 자동화 시스템 운영 절차

먹매김 시공 자동화 시스템의 구성에 따른 단계별 운영 절차는 Figure 2와 같다. 사전 준비단계에서는 관리자 PC의 프로그램을 활용하여 먹 도면 및 로봇 이동 경로를 생성한 후, 해당 정보를 제어부(단말기)로 전송하고 측량과정을 통해 현장 좌표와 맵핑을 수행한다.

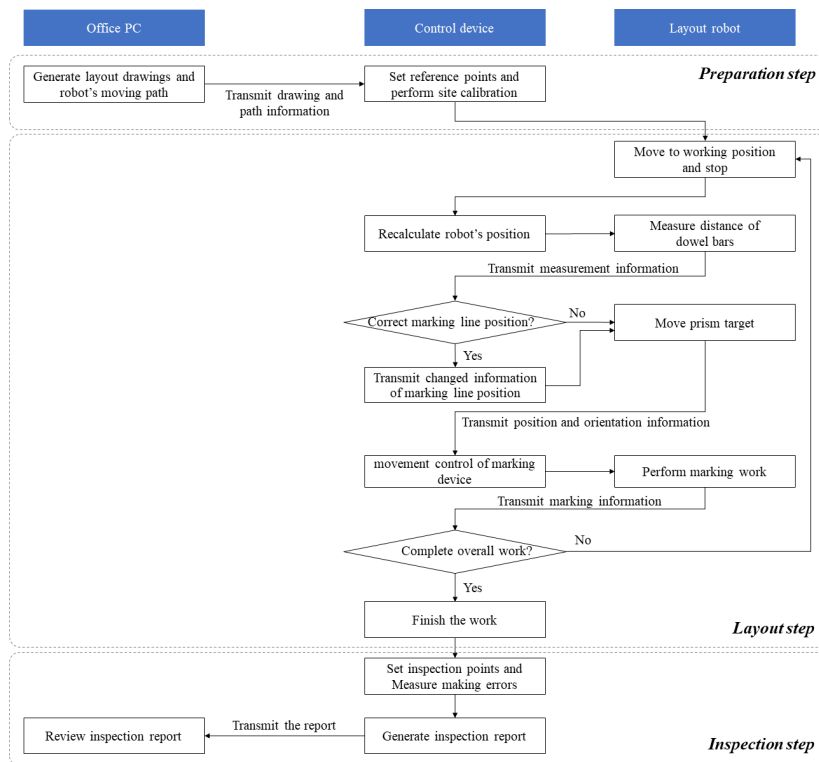


Figure 2. Operation procedure on layout automation

떡매김 단계에서는 로봇 상부의 프리즘 타겟과 토달스테이션의 통신을 통해 로봇의 위치를 계산하여 이동, 정지한 후 센싱을 통해 해당 구역의 철근 거리 측정 및 먹선 보정 여부를 판단한다. 보정이 필요할 시 먹선 보정 위치정보를 전송하고 프리즘 이동을 통해 로봇의 정밀자세 정보를 획득한 후, 마킹부의 회전 및 이동을 통해 일정 거리의 마킹 작업을 수행하게 된다. 이후 작업정보를 전송하여 해당 층의 작업완료 시까지 떡매김 작업을 반복 수행한다.

검측 단계에서는 제어 단말기의 해당 층 도면에서 검측 위치를 설정한 후 토달스테이션의 자동 시준을 통해 표시 오차를 측정한다. 모든 위치의 검측을 수행 후 해당 층의 검측 결과 보고서를 생성하여 전송 후 결과 검토를 진행한다.

3. 떡매김 시공 자동화 로봇 개발

골조공사 떡매김 시공 자동화를 위해 필요한 요소기술 및 운영절차를 토대로 하여 떡매김 시공 자동화 로봇의 상세설계 및 프로토타입(prototype) 개발을 수행하였다 (Figure 3 참조). 전체 로봇의 크기는 전장 874mm, 전폭 657mm(마킹부 포함), 전고 844mm(프리즘 포함)이며, 전체 무게는 약 50kg이다. 떡매김 시공 자동화 로봇은 크게 1) 로봇의 주행을 위한 구동부, 2) 떡매김 선의 프린팅을 위한 마킹부, 3) 장애물 및 철근 인식을 위한 센싱부, 4) 로봇의 이동 및 마킹 제어를 위한 제어부로 구성된다.

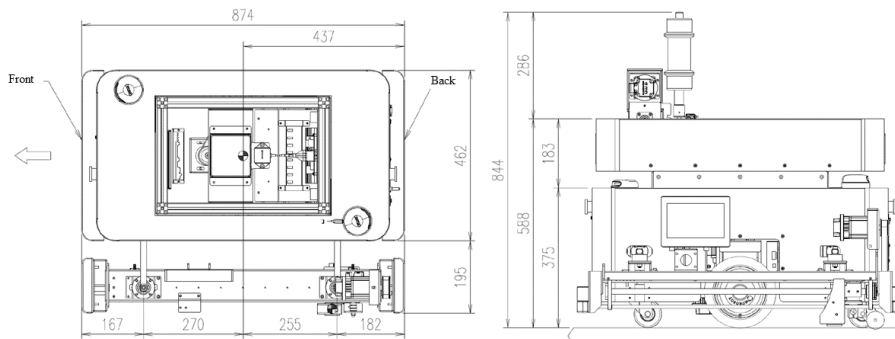


Figure 3. Robot prototype design and size

3.1 구동부

로봇의 구동부는 바닥면의 평활도가 제대로 확보되지 않은 상태와 좁은 공간에서의 효율적인 이동의 필요성을 고려하여 바퀴의 크기, 재질, 구동방식 등을 결정하였다. 이에 로봇 중앙부 좌우에 직경 192mm의 구동 바퀴를 배치하였으며, 안정적으로 균형을 잡기 위하여 직경 72mm의 보조 바퀴를 앞뒤 각 2개씩 4개를 배치하였다(Figure 4).



Figure 4. Robot drive unit

구동 바퀴는 고무 재질 및 충격흡수장치(shock absorber) 사용을 통해 일정한 접지력을 확보하며 안정적인 주행이 가능하도록 하였으며, 좌우 2자유도와 회전 1자유도 구동모듈을 통해 앞, 뒤로 움직이는 직선 주행, 바퀴의 각도를 틀어 진행하는 선행주행, 바퀴의 각도를 최대 좌우 90도까지 틀어 몸체는 고정하고 바퀴의 움직임만으로 구동하는 사선 주행과 제자리 회전까지 자유자재로 움직임을 구사할 수 있다. 전체 작업 생산성 확보를 위하여 최대 초당 1m까지의 주행 속도를 확보할 수 있도록 구현하였으며, 전원 공급장치는 24V, 35Ah의 리튬이온(lithium-ion) 배터리를 사용하여 최대 8시간의 로봇 구동이 가능하도록 하였다.

3.2 마킹부

마킹부는 이음철근이 존재하는 골조공사 환경과 마킹 정밀도 확보를 고려하여 로봇 몸체의 좌측 측면부에 설치하고, 일정거리 이동 및 회전이 가능하도록 제작하였다(Figure 5).

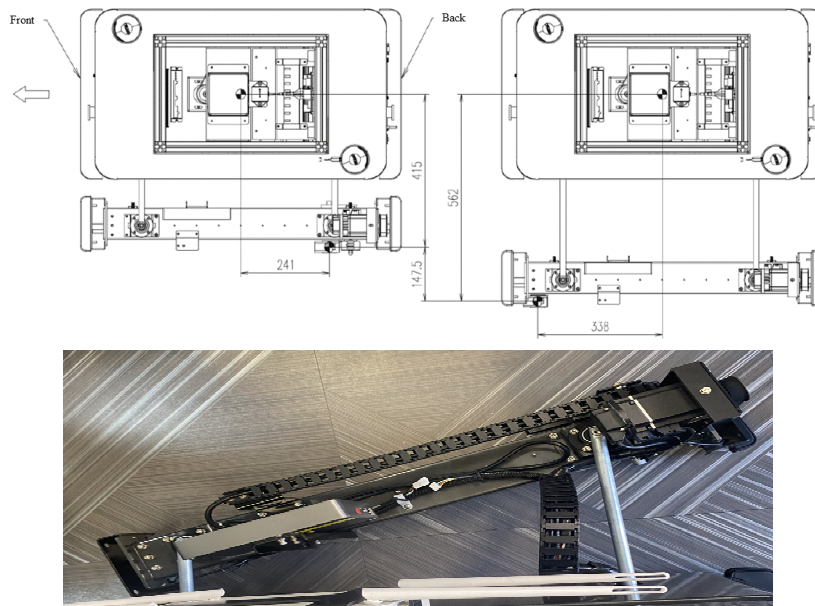


Figure 5. Robot marking unit

마킹부는 크게 실제 먹매김 작업을 수행하는 프린팅 모듈(printing module)과 마킹 유닛을 지지하며 이동 및 회전이 가능한 지지 모듈(supporting module)으로 구성된다. 프린팅 모듈은 별도의 잉크 공급장치 없이 잉크 카트리지로부터 직접 분사하며, 바닥면으로부터 최대 10mm까지 떨어진 상태에서도 먹선의 품질을 유지하며 분사가 가능하다. 지지 모듈을 따라 1회 최대 530mm의 직선(실선 또는 점선) 및 최대 2개 라인을 동시에 마킹할 수 있도록 설계되었다. 지지 모듈은 프린팅 모듈의 안정적인 지지를 위하여 2점 지지 방식을 적용하였으며, 지지부 각각 최대 약 150mm 이동, 15도의 회전이 가능하도록 설계되어 로봇의 이동 후 정지 위치의 오차를 반영하여 마킹 정밀도 확보가 가능하다.

3.3 센싱부

현재 로봇에 설치되어있는 센서는 라이다(LiDAR) 센서, 초음파 센서, 경사각 센서가 있다. 라이다 센서는 근적외광 및 가시광, 자외선을 사용하여 대상물에 빛을 비추고, 그 반사광을 광센서를 통해 검출하여 거리를 측정하는 리모트 센싱(remote

sensing) 장치의 하나로[11], 로봇의 전방 우측, 후방 좌측에 각 1개씩 2D 라이다 센서 2개가 배치되었다(Figure 6). 해당 센서는 장애물 감지와 함께 로봇이 정지한 상태에서 철근 위치를 파악하여 먹선 보정 여부를 판단하기 위한 목적으로 활용된다. 초음파 센서는 거리뿐만 아니라 시야와 관계없이 장애물의 존재 여부를 직접적으로 얻을 수 있으며 다른 센서보다 비용이 적게 들어 자율 주행 로봇에 많이 사용된다[12]. 초음파 센서는 전방 및 후방에 각 2개씩 4개가 설치되어 장애물 인식, 회피 목적으로 활용된다. 경사각 센서는 로봇 몸체의 기울기 검출을 위해 장착되어 로봇의 정밀자세 확인에 활용된다.



Figure 6. LiDAR sensor

로봇 위치를 제어하기 위한 토탈스테이션은 미리 제작된 도면을 인식시킨 뒤 현장에서 두 개 이상의 기준점을 설정하고 좌표를 측정해 로봇에 전달하며 이때 전달받는 로봇은 프리즘의 위치를 기준으로 작업을 진행한다. 로봇의 프리즘은 Figure 7과 같이 본체 상부에 설치되어 있으며, 프리즘 하부에 로봇의 X축(전후 방향), Y축(좌우 방향) 방향으로 이동가능한 모듈(X축 이동거리 358mm, Y축 이동거리 238mm)과 연결되어 로봇의 정밀자세 확인이 가능하도록 하였다.

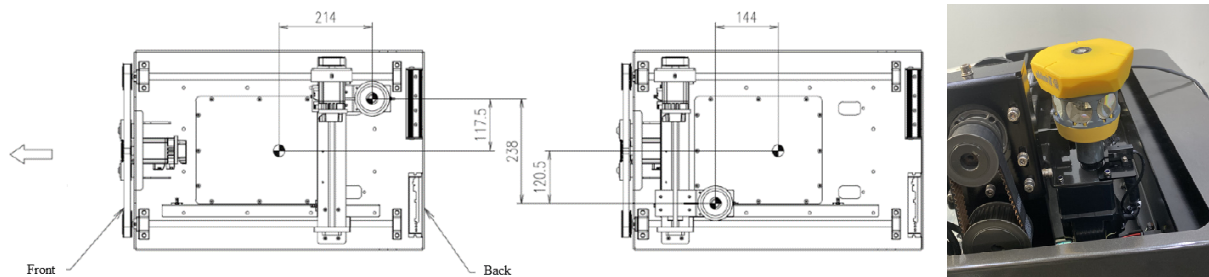


Figure 7. Robot prism

3.4 제어부

3.4.1 전체 제어블록도

먹매김 시공 자동화 로봇은 현재 시제품 단계로 개발 중이지만 추후 현장에서 운용되기에 기본적으로 무선으로 제어하는 것을 기본으로 한다. Figure 8은 로봇의 제어 형식을 보여준다. 사용자는 로봇에 내장된 메인 제어기와 RS232 (Recommended Standard 232) 시리얼 통신을 하여 데이터를 주고받으며 추가적으로 자체 제작한 API(Application Programming Interface)를 통해서 로봇을 제어할 수 있다. 해당 통신은 최대 통신속도 20kb/s, 통신방식은 15m 이상의 통신거리를 가지고 있어 산업 장비에서 주로 사용되고 있는 통신방식이다. 로봇의 메인 제어기 데이터는 크게 디지털 In/Out, 모션제어시스템, 기타 센서

모듈 3가지의 정보에 추가하여 무선조종기 데이터도 주고 받는다. 이때 사용하는 RS485 통신은 TIA(Telecommunications Industry Association), EIA(Energy Information Administration) 485에서 유래되어 산업용에 널리 사용되고 있으며, 다른 통신방식에 비해 통신거리가 길어 산업 장비에서 주로 사용되는 통신방식 중 하나이다[13].

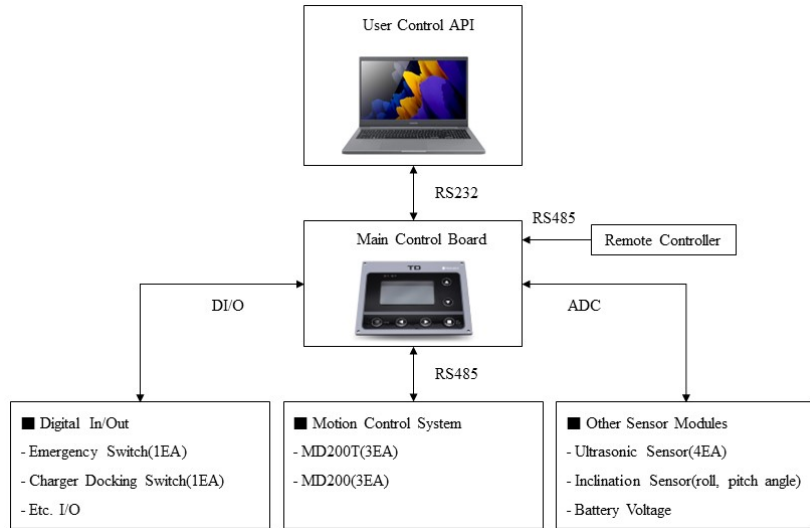


Figure 8. Control diagram

3.4.2 로봇 제어 API 및 제어 프로그램 개발

API(Application Programming Interface)는 소프트웨어 구성 요소가 서로 통신할 수 있게 하는 메커니즘이며 로봇의 모듈을 제어할 수 있도록 설계되었다. Table 1은 Windows 환경에서 사용하는 로봇제어 API이다. 약 10개의 버튼을 사용하여 로봇을 제어하며 로봇에 움직임을 명령하는 Move1은 이동 거리 및 속도를 설정하여 이동, Movec는 현재 개발 중이며, Movev는 벡터 움직임과 각도 및 속도를 설정했다. Set_handle은 조향 각도를 설정하여 바퀴를 원하는 방향으로 움직이고 Rotation

Table 1. API Description

Command	Explanation
Move1	Set travel distance and speed
Movec	Developing
Movev	Vector motion settings, angle and speed settings
Set_handle	Steering angle
Rotation	Turn in place
Move_prism	X,Y movement and rotation angle of the prism
Print	1. Back to front 2. Front to back 3. Moving while printing from back to front 4. Moving while printing from front to back 5. Return after moving while printing from back to front
Print_2	Input start and end positions of inkjet and print speed
Move_p12	Inkjet position shift
Stop_	Stop actions

은 각도와 속도를 정하여 회전할 수 있는 명령어다. 로봇의 움직임 말고도 Move_prism을 통해 프리즘을 x, y 방향으로 움직이며 각도 조절이 가능하며 Print 명령어는 5가지로 세분화하여 프린트를 시행해 상황에 따라 사용할 수 있고 Print_2 명령어를 통해 시작점 위치 끝점 위치를 정하여 원하는 길이만큼 먹 작업을 시행할 수 있다. 마지막으로 Move_p12는 지지 모듈의 전방이 P1, 후방이 P2 지지부 움직임을 구현 가능하게 하며, posi는 잉크젯의 위치 수정, Stop은 각각의 명령어에 에러가 있거나 충돌 위험이 있을 시 동작을 바로 정지시킬 수 있는 명령어다.

제작한 API를 사용하여 먹매김 로봇의 제어 프로그램을 개발 중에 있으며, 프로그램 구성은 Figure 9와 같다. 해당 프로그램을 통해 토탈스테이션과 프리즘을 이용한 로봇 제어 절차는 다음과 같다: 1) 새 프로젝트 생성, 2) 도면 추가, 3) 토탈스테이션 기준점 설정을 위한 기준점 추가, 4) 먹매김 로봇, 토탈스테이션 연결, 5) 토탈 스테이션 기준점 설정, 6) 먹매김 작업순서 결정, 7) 로봇 현재 위치 확인 및 작업위치로 이동, 8) 순서에 따른 먹매김 작업 반복.



Figure 9. Control program

4. 먹매김 시공 자동화 로봇 성능시험

4.1 주행 성능

우선 로봇제어 API를 이용하여 로봇의 주행 능력을 평가했다. 테스트는 실내에서 진행이 되었고 바닥은 콘크리트 재질로 이루어져 있으며 직선 주행가능 거리는 5m 정도이다. 직선 주행 성능의 경우, 1회 먹매김 길이를 고려하여 600mm의 거리와 현장 상황을 고려한 최대 거리인 5,000mm로 설정하였으며, 주행 속도는 작업에 제약이 없을 정도로 판단되는 100mm/s, 200mm/s, 300mm/s로 설정하였다. 각각의 거리와 속도 값에 대한 평가를 5회 측정하여 입력한 거리에 대한 실제 이동 거리를 비교하여 오차를 도출하였다. 최대 오차는 600mm의 거리에서 속도 300mm/s일 때 256mm, 최소 오차는 5,000mm의 거리에서 속도 200mm/s일 때 5mm였으며, 평균 오차는 약 100mm로 나타났다.

다음으로는 로봇의 사선 주행 성능을 평가하기 위하여, 각도는 45°, 거리는 1,000mm와 2,000mm로 설정하였으며, 주행 속도는 직선 주행시와 동일하게 적용하였다. 각각의 거리와 속도 값에 대한 평가를 3회 측정하여 평균 이동 거리를 내었으며 실험 결과의 값의 평균 거리는 입력한 이동 거리의 약 1.5배로 나타났다. 이에 따라 사선 주행시 오차 원인에 대한 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

제자리 회전 성능에 대해서는 로봇의 시작 지점 위치를 기준으로 마킹 작업을 실행한 후 설정한 각도마다 선을 그어 회전 직전 위치에서 그은 선과 회전한 후 그은 선이 이루는 각도를 파악하였다. 실험 결과 평균 약 2.75°의 오차가 발생하였으며, 최대 오차는 90°로 설정하였을 때 6.5°, 최소 오차는 45°로 설정하였을 때 0°의 오차로 나타났다.



위와 같이 로봇의 전반적인 주행 방식별 기초 성능을 확인하였으며, 직선 주행 및 제자리 회전에 따른 오차는 마킹부에서

의 위치 보정을 통해 해결 가능할 것으로 판단되나, 사선 주행의 경우 로봇 또는 제어 부분의 오류를 확인하여 개선이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 입력값에 대한 결과값의 오차가 일정하지 않음으로 이동 및 회전에 대한 오차를 더욱 자세히 파악하기 위해 다양한 이동 거리, 속도, 환경에서 성능 평가를 하는 것이 필요하다.

4.2 마킹 성능

마킹 성능에 대해서도 우선 로봇 제어 API를 이용하여 마킹 길이와 품질을 확인하였으며, 로봇 설계 시 최대 길이인 530mm와 100mm 길이를 대상으로 측정했다. Table 2와 같이 1회 마킹 길이는 최대 530mm까지 가능하도록 설계되었지만, 실제 마킹 길이는 약 520mm로 나타난 반면, 입력값이 100mm일 때는 해당 길이만큼 먹선이 생성되었다. 먹선의 두께와 직선도 측면에서는 만족할 만한 성능을 보였으나, 마킹 작업 정지 후에도 잉크가 일시적으로 분사되는 문제점이 발생하여 먹선 길이에 따른 잉크 분사 조절 프로그램 설정의 수정이 필요한 것으로 파악되었다.

Table 2. Results on marking length and quality

Input	Result	
	Picture	Output
530mm		520mm
100mm		100mm

먹매김 시공 자동화 로봇을 토탈스테이션으로 제어해 먹매김 작업 오차 및 작업시간을 도출하기 위한 테스트를 수행하였다. 먼저 마킹 오차를 측정하였는데 먹매김 총 작업 길이는 2,000mm로 하고, 1회 마킹 길이는 400mm로 설정하여 3회 반복하였다. 그 결과, 총 15번의 먹매김 작업을 진행하였고 기준선을 기점으로 최대오차 17mm, 최소오차 0.2mm로 평균 9.3mm 오차가 도출되었다. 작업시간을 도출하기 위해 테스트를 수행하는 작업의 기준은 1 cycle 별로 측정하였는데 1 cycle은 1) 로봇 프리즘의 위치조정, 2) 위치조정에 따른 로봇 이동, 3) 먹매김 작업이며 작업 동안 로봇의 이동속도는 60mm/s 설정하였다. 먹매김 작업에 따른 소요 시간은 15번의 작업 동안 평균 시간을 기준으로 1) 프리즘 위치조정 약 27초, 2) 로봇의 이동 약 35초, 3) 마킹작업 약 20초로 총 82초가 소요되었다.

실험 결과 마킹 평균오차는 9.3mm로 목표로 한 3mm 오차는 현재 충족하지 못한 것으로 나타났으나, 최소 0.2mm 오차까지의 정밀한 성능 확보도 가능한 것으로 파악되었다. 이에 지속적인 실험을 통한 추가적인 성능확인과 함께 로봇의 하드웨어 및 정밀제어 알고리즘 개선이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 실험 결과를 기준으로 1m 길이 마킹시 3분여의 작업시간이 소요되는 것으로 나타나 목표 성능(1분/m)에는 부족하나, 로봇과 마킹부의 이동속도를 높이고 프리즘의 위치조정 소요시간을 단축한다면 작업시간 측면에서의 성능 목표는 충분히 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 인력으로 진행되어왔던 먹매김 작업을 자동화하기 위하여 개발한 먹매김 로봇의 프로토타입을 소개하고 기초 성능을 평가하였다. 로봇의 제어를 위해 개발된 API 및 제어 프로그램을 사용하여 주행 및 마킹 성능을 확인하였으며, 주요 결과는 다음과 같다. 우선, 로봇과 API, 토탈스테이션과 프리즘간 데이터 송수신은 원활히 이루어졌으며, 전반적

인 로봇의 주행 및 마킹부 구동은 정상적으로 이루어졌다. 주행 성능에 있어서는 직선 주행 및 제자리 회전 오차는 마킹부 제어를 통해 해결가능한 수준으로 나타났으나, 사선주행 오차는 개선이 요구된다. 마킹 성능의 경우 전반적인 마킹 품질은 비교적 일정하였으나, 정밀도 측면에서는 목표 성능을 충족하지 못하여 로봇 하드웨어 및 제어 알고리즘 개선이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 실험 결과를 토대로 사선주행 및 마킹 오차, 로봇 정밀자세 확인 소요시간 측면에서 프로토타입의 하드웨어, 소프트웨어 개선이 우선적으로 요구되며, 추가적인 실험실 테스트와 현장 적용실험을 통해 개발 장비의 지속적인 개선 및 성능보완을 위한 기초 데이터로 활용될 것이다. 향후 전반적인 요소기술 통합을 통해 사전 준비단계부터 검측 단계까지 전체 먹매김 공정의 자동화 시스템을 구축하고자 한다.

요약






건축물 골조공사에서 먹매김 작업은 건축물 구조부재 요소를 정확한 위치에 시공하기 위해 높은 정밀도가 요구되나, 현재 인력에 의해서 진행되어 작업자의 숙련도에 따라 먹 위치 정확도 및 정밀도가 저하되고, 정보손실 및 오류 발생에 따른 생산성 저하 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위해 전반적인 먹매김 공정의 자동화 및 정보화 기술 도입이 요구되며, 건설로봇을 활용한 먹매김 자동화는 효과적인 수단이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 건축물 골조공사의 먹매김 시공자동화 로봇의 프로토타입을 개발하고 기초성능을 평가하였다. 개발된 로봇은 크게 주행부, 마킹부, 센싱부, 제어부로 구성되었으며, 골조공사 환경을 고려하여 다양한 주행방식과 마킹부 이동 및 회전이 가능하도록 설계되었다. 주행 및 마킹 성능 실험 결과, 주행 거리 오차 및 마킹 품질측면에서는 만족할 만한 성능을 보였으나, 일부 주행방식과 마킹 정밀도 측면에서의 개선 필요성이 확인되었다. 본 연구결과를 토대로 개발 장비의 지속적인 개선 및 성능 보완, 전체 먹매김 공정의 자동화 시스템 구축을 진행하고자 한다.

키워드 : 골조공사 먹매김, 건설로봇, 건설자동화

Funding

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(Grant 21CTAP-C163790-01) and by research fund from Chosun University, 2022.

ORCID

Gyuseon Park,  <https://orcid.org/0000-0003-4530-0341>
 Taehoon Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-2869-0061>
 Hyunsu Lim,  <https://orcid.org/0000-0002-3364-5118>
 Jhonghyun Oh,  <https://orcid.org/0000-0001-7992-2400>
 Kyuman Cho,  <https://orcid.org/0000-0001-5008-110X>

References

1. Kim S, Peavy M, Huang PC, Kim K. Development of BIM-integrated construction robot task planning and simulation system.

- Automation in Construction. 2021 Jul;127:103720. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103720>
2. Kim S. Development of automation technology for construction innovation. *Construction Engineering and Management*. 2019 Aug;20(4):27-9.
 3. Pan M, Pan W. Understanding the determinants of construction robot adoption: perspective of building contractors. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020 May;146(5):04020040-1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001821)
 4. Brosque C, Skeie G, Orn J, Jacobson J, Lau T, Fischer M. Comparison of construction robots and traditional methods for drilling, drywall, and layout tasks. 2020 International congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA). 2020 June 26-28; Ankara, Turkey. Artvin (Turkey): Artvin Coruh University and IEEE Turkey Section; 2020. p. 1-14. <https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152871>
 5. Takehiro T, Kazuyuki M, Mikita M. Improvement of automated mobile marking robot system using reflectorless three-dimensional measuring instrument. 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2019 May 21-24; Banff, Canada. Edinburgh (United Kingdom): The International Association for Automation and Robotics in Construction; 2019. p. 756-63. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0102>
 6. Takashi K, Kouji S, Joji O. Marking robot in cooperation with three-dimensional measuring instruments. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2018 Jul 20-25; Berlin, Germany. Edinburgh (United Kingdom): The International Association for Automation and Robotics in Construction; 2018. p. 292-9. <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0042>
 7. Lim H, Cho K, Kim, T. Development directions for automated layout system of building structures. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*. 2021 Oct;21(5):387-96. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2021.21.5.387>
 8. Kim T, Lim H, Cho K. Conceptual robot design for the automated layout of building structures by integrating QFD and TRIZ. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022 May;120:1793-804. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08803-2>
 9. Lim H, Kim T, Kim T, Kim CW. Path optimization method for shifting path planning of marking robot. *Proceeding of Korea Institute of Building Construction*; 2022 Apr 20-22; Naju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2022. p. 144-5.
 10. Lim H, Kim T, Cho K, Kim T, Kim CW. An algorithm of making line correction for robot-based layout automation of building structures. *Proceedings of the 9th International Conference on Construction Engineering and Project Management*; 2022 Jun 20-23; Las Vegas, USA. Las Vegas (USA): the ICCEPM2022 Organizaing Committee; 2022. p. 312-8.
 11. Lee DM. Development of moving objects monitoring and transforming personal robot system based on remote controls. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 2010 Jan;11(1):159-65. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.1.159>
 12. Moon I, Hong WK, Ryu JT. Design of ultrasonic sensor based obstacle recognition mobile robot. *Journal of Embedded Systems and Applications*. 2011 Oct;6(5):327-33. <https://doi.org/10.14372/IEMEK.2011.6.5.9>
 13. Hong BJ, Kim CG, Choi EH, Lee NY. An empirical study on the security of RS-485 communication. *Journal of The Korea Society of Information Technology Policy & Management*. 2018 Aug;10(4):917-22.