

Research Paper

마킹 로봇의 자동화를 위한 LiDAR 센서 기반 철근배근 오차 측정 및 먹매김 수행 프로세스 연구

Measuring Rebar Position Error and Marking Work for Automated Layout Robot Using LiDAR Sensor

김태훈¹ · 임현수^{2*} · 조규만³

Kim, Taehoon¹ · Lim, Hyunsu^{2*} · Cho, Kyuman³

¹Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju, 61452, Korea

²Assistant Professor, Department of Architecture, Soonchunhyang University, Asan-si, Chungcheongnam-do, 25601, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju, 61452, Korea

*Corresponding author

Lim, Hyunsu

Tel : 82-41-530-1539

E-mail : hslim@sch.ac.kr

Received : December 20, 2022

Revised : January 10, 2023

Accepted : January 16, 2023

ABSTRACT

Ensuring accuracy within tolerance is crucial for a marking robot; however, rebar displacement frequently occurs during the structural work process, necessitating corrections to layout lines or rebar locations. To guarantee precision and automation, the marking robot must be capable of measuring rebar error and determining appropriate adjustments for marking lines and rebar placement. Consequently, this study proposes a method for measuring rebar location error using a LiDAR sensor and implementing a layout assessment process based on the measurement results. The rebar recognition experiment using the LiDAR sensor yielded an average error of 5mm, demonstrating a reliable level of accuracy for wall rebars. Additionally, this research proposed a process that enables the robot to evaluate rebar and marking corrections based on the error range. The findings of this study can contribute to the automated operation of marking robots while accounting for construction errors, potentially leading to improvements in structural quality.

Keywords : layout automation, marking robot, rebar placing error, judgment of marking work, LiDAR sensor

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축공사에서 인력 기반 먹매김 작업에 따른 생산성과 품질 저하 문제를 해결하기 위한 방안으로 로봇을 활용한 먹매김 시공 자동화[1-4]가 추진되고 있다. 먹매김 자동화 로봇은 허용오차 이내의 마킹(marking) 정밀도 확보가 가장 중요한 성능 목표로 설정되나, 시공 과정에서의 작업 오차를 반영한 자동화 기술의 확보가 함께 요구된다. 특히, 골조공사의 경우 하부층에 배근된 수직 철근이 콘크리트 타설 과정에서 계획된 배근 위치에서 이탈하기 쉽고 즉각적인 위치 조정이 어려워 시공 오차가 발생하며, 피복 두께 확보에 문제를 초래한다. 이 경우 철근을 허용범위 내로 이동시키거나 피복 두께를 확보하기 위해 먹매김 선을 보정할 필요가 있으며, 현재 이러한 보정은 현장 감독자를 통해 직관적으로 결정되어 철근 또는 먹선의 보정이 추가적으로 이루어진다. 이는 사전에 관련 정보가 없는 상태에서 이루어져 번거로울 뿐 아니라 검사과정에 많은 시간을 요



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.

구한다.

이에 따라 골조공사의 먹매김 자동화를 위한 마킹 로봇(marking robot) 개발시 철근의 배근 오차를 파악하고 상황에 따라 적절한 대응 및 관련 정보제공 기능이 요구된다. 로봇이 철근 배근 오차를 파악하지 않고 작업을 수행할 경우, 상황에 따라 먹매김 수행이 불가하거나 철근 피복 두께 확보에 대한 적정성 판단 과정에 기존과 동일한 인력 개입을 요구하게 된다. 이는 전반적인 자동화 효율뿐 아니라 구조체 품질의 저하를 야기한다.

본 연구에서는 골조공사 먹매김 자동화를 위하여 LiDAR 센서를 이용한 철근배근 오차 측정 및 판단을 통한 먹매김 수행 프로세스를 제시하고자 한다. 본 연구의 목적상 현재 개발이 진행 중인 건축물 골조공사 먹매김 자동화를 위한 마킹 로봇[1]의 운영방식 및 국내의 관련 기준을 고려하여 적정 방안을 도출하였다. 본 연구 결과는 골조공사의 먹매김 자동화를 위한 마킹 로봇의 성능 및 자동화 기술 도입 효과 향상에 기여할 것이다.

1.2 연구의 범위 및 절차

본 연구는 골조공사의 바닥 먹매김 작업을 대상으로 건설로봇을 활용한 자동화 방식에 요구되는 기술 중 하나로서, 적정 센싱 기술을 활용하여 하부 층에 배근된 벽체 수직 이음철근의 위치 오차를 측정하고 이를 바탕으로 피복 두께 및 먹선 보정 여부를 판단하기 위한 방안을 제시하는 것으로 연구의 범위를 한정한다. 현재 상용화된 골조공사용 먹매김 자동화 기술은 없기 때문에, 본 연구에서는 Lim et al.[5] 및 Kim et al.[1]의 연구를 토대로 개발이 진행 중인 골조공사용 마킹 로봇의 운영방식을 고려하여 적정 방안을 제시하도록 한다.

본 연구 절차는 다음과 같다. 우선 개발 중인 마킹 로봇의 구성 및 운영방식을 소개하고, 문헌 고찰을 통해 골조공사의 시공오차 보정 기준 및 철근 인식 자동화 기술을 파악하여 본 연구 목적상 적합한 철근인식 기술 및 방안을 도출한다. 이후 선정된 기술의 측정장비를 활용하여 실험실 및 현장 실험을 진행함으로써 철근인식 및 배근 오차 측정 목적으로의 적용 가능성을 파악하였다. 마지막으로, 측정 결과를 토대로 피복 두께 및 먹선 보정 여부 판단을 위한 방안을 제시하도록 한다.

2. 예비적 고찰

2.1 골조공사용 마킹 로봇

최근 국내에서는 건축물 골조공사의 바닥 먹매김 작업을 대상으로 시공 자동화 및 관리플랫폼 개발 연구가 진행되고 있다. 해당 연구의 핵심 기술은 골조공사 환경을 고려하여 스스로 위치를 인식하며 이동 및 정밀한 먹매김 작업 수행이 가능한 마킹 로봇(marking robot)의 개발이라고 볼 수 있으며, 현재 Figure 1과 같이 프로토타입(prototype)의 제작이 완료된 상태이다.

해당 로봇은 크게 구동부, 마킹부, 센싱부, 제어부로 구성되며, 현장에 설치된 토탈스테이션(total station)과 로봇 상부에 설치된 프리즘(prism) 타겟을 이용하여 실시간 정밀 위치 제어를 수행한다. 바닥면의 평활도가 제대로 확보되지 않은 조건에서 마킹 정밀도를 확보하기 위하여 로봇은 특정 위치에 정지한 상태에서 약 500mm 내외 길이의 선을 마킹하는 방식으로 운영된다. 또한 주행을 통한 정지 위치의 정밀도가 떨어지더라도 마킹부에서 일정 거리(최대 150mm) 및 각도(최대 15°)의 회전이 가능하여 마킹 위치 정밀도를 확보할 수 있도록 하였다. 이에 따라 개발된 마킹 로봇은 1) 작업 위치 정지, 2) 로봇의 위치, 각도, 기울기 등의 정밀자세 확인, 3) 마킹부 이동, 회전 및 마킹작업 수행, 4) 작업정보 전송 및 다음 작업 위치까지 이동, 5) 1~4번 작업 반복의 순서로 먹매김 작업을 수행하게 된다.

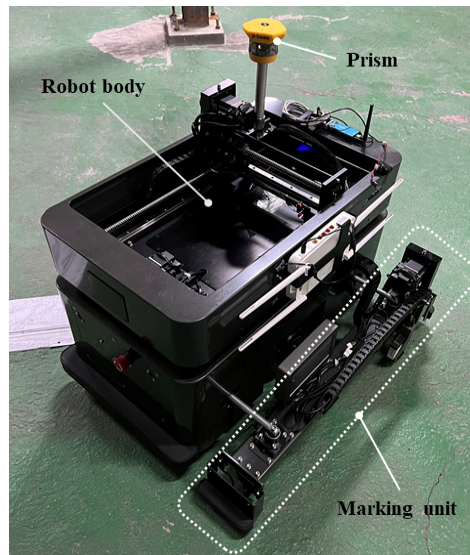


Figure 1. Prototype of Marking Robot

2.2 골조공사 시공오차 보정 기준

기존의 건축물 골조공사에서 시공오차가 발생하였을 경우 골조의 위치 및 기울기를 변경하는 방식으로 오차를 보정하게 된다. 이러한 오차 보정은 크게 외벽과 내벽으로 구분하여 이루어지게 되며, 외벽의 경우는 위치 및 기울기의 오차를 외벽거푸집의 기울기로 보정하여 상부층을 시공하며, 내벽의 경우 기준점에 맞게 먹선을 새롭게 그려 오차를 보정하는 방식을 적용한다.

골조공사 바닥 먹매김 작업의 대상인 내벽의 경우 1층의 기준점을 중심으로 하여 정확한 먹선을 바닥면에 그리면 전체 골조의 오차가 발생하더라도 내벽선에 대한 보정이 이루어지나, 수직 이음철근 배근 위치에 오차가 발생하는 경우 피복두께가 확보되지 못하거나 철근이 먹선을 벗어나 먹선이나 철근위치를 보정해야 한다. 수직 이음철근의 위치가 이탈할 경우 겹이음의 간격과 피복두께의 확보가 중요해진다. 철근 겹이음 간격의 경우 구부러 겹쳐이으면 되기 때문에 수정이 용이한 반면, 피복두께가 확보되지 않는 경우 철근공사 시공지침서[6]에 따라 슬래브를 천공 후 제 위치에 철근을 다시 시공하거나 벽체 두께를 추가하여 확보하여야 한다. 또한, 벽체 철근의 피복두께는 10mm의 허용오차(유효깊이 200mm 이내인 경우)를 기준으로 하며[7], 벽체두께의 허용 오차범위는 건축법에 따른 건축허용오차[8]를 기준으로 벽체두께의 3% 이내로 정의되어 있다.

결과적으로 벽체 피복두께의 허용오차 범위를 벗어난 경우 벽체 두께 3% 이내에서는 철근을 이동하지 않고 먹선으로 보정이 가능하나 이를 벗어날 경우에는 철근을 구부리거나 천공하여 철근을 시공해야 한다. 하지만, 현장에서의 실무자 인터뷰 결과 실무적으로는 철근 천공이 현실적으로 쉽지 않기 때문에, 마감재 설치 공차를 고려하여 피복 및 벽체 두께의 허용오차와 마감재 공차 이내까지는 철근을 구부리거나 먹선을 보정하는 방식을 사용하며 이를 벗어날 경우 천공하여 연결철근을 시공하는 방식으로 진행하는 것으로 파악되었다.

이에 자동화 로봇을 통해 먹매김 진행시 배근된 이음철근의 시공오차를 고려하지 않을 경우 먹매김 과정에서 먹선의 간섭이 발생되거나 추후 인력에 의한 번거로운 검사 및 조치 과정이 요구된다. 따라서 로봇의 운영과정에서 배근된 철근의 위치에 따른 피복두께를 측정하고 이를 토대로 한 적절한 대응 및 후속조치를 위한 정보 제공을 통해 보다 효율적인 먹매김 자동화 기술 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2.3 철근 인식 자동화 기술

철근을 인식하기 위한 자동화 기술은 초음파, 카메라, 레이저 스캐너 등을 사용하여 철근의 위치, 지름, 간격, 교차점 등을 파악하는 방식이 적용되고 있다. Masri et al.[9]은 유도파(guided wave)를 이용하여 콘크리트 내부 철근 철근 지름을 측정함으로써 철근의 부식상태를 검사하는 데 활용하였다. 정확도가 비교적 높고 편차가 적은 장점이 있는 반면, 측정 장비의 부피가 크고 좌표데이터를 철근의 지름으로 변환하는 과정에 시간이 소요되는 한계가 있다[9].

카메라를 이용한 기술은 철근 배근 부위 사진과 이미지 프로세싱(image processing)을 통해 철근을 인식하는 방법으로, Jin et al.[10]의 연구에서는 철근 결속 자동화 로봇을 이용해 철근 결속 지점을 인식하기 위한 방안으로 RGB-D 카메라를 통해 철근 인식 및 교차점 위치 추출을 위해 사용되었다. 이미지를 이용함에 따라 측정 및 데이터 처리에 상대적으로 적은 시간이 소요되는 반면, 촬영 거리 및 외부 환경적 요인에 따른 인식율 및 정확도 편차가 크게 나타나는 한계를 지닌다.

레이저 스캐닝을 통한 철근 인식 기술은 철근의 배근간격 및 지름 등의 상태를 파악할 수 있으며, 콘크리트 타설 전 철근 검측을 자동화하기 위한 용도로 활용되고 있다[11]. 철근이 선형임을 활용하여 각 좌표의 빈도가 높은 영역을 추출하고 배근 순서를 통해 각 좌표의 해당하는 철근을 인식할 수 있다. 스캔 영역에 따라 취득된 점군(point clouds) 데이터가 많은 경우 인식을 위한 데이터 처리와 연산과정에 시간이 많이 소요되지만 편차가 적고 정확도가 높은 장점을 지닌다.

떡매김 로봇의 철근 인식을 위해서는 정확도뿐 아니라 측정 및 데이터 처리 속도, 사용성 측면이 함께 고려되어야 한다. 이러한 관점에서 레이저 스캐닝 기술이 상대적으로 적합하나, 3차원의 데이터를 수집할 경우 데이터 처리 및 연산 과정에 상당한 시간이 소요될 수 있다. 이에 Lim et al.[12]의 연구에서는 2D LiDAR 센서를 활용하여 철근 인식 및 피복두께를 파악하는 방안을 제시하였다. 해당 연구에서는 설계된 떡매김 로봇의 작업 방식(정지 후 일정거리 먹선 생성)과 데이터 처리속도 향상을 통한 신속한 작업 진행을 위하여, Figure 2와 같이 로봇이 정지한 위치에서 바로 다음 떡매김 작업이 진행될 일정 지점의 철근만을 대상으로 센싱한 후 해당 철근들의 배근오차에 따른 피복 두께를 파악하는 방식을 제시하였다. 또한 이를 토대로 철근 배근 오차에 따른 보정 여부 판단 방안을 제안하였다. 본 연구에서는 선행 연구[12]를 토대로 실험을 통해 철근인식 및 피복두께 측정을 위한 2D LiDAR 센서의 활용 가능성을 파악하고, 개발중인 마킹로봇을 고려하여 철근배근 오차 및 떡매김 판단 프로세스를 제시하고자 한다.

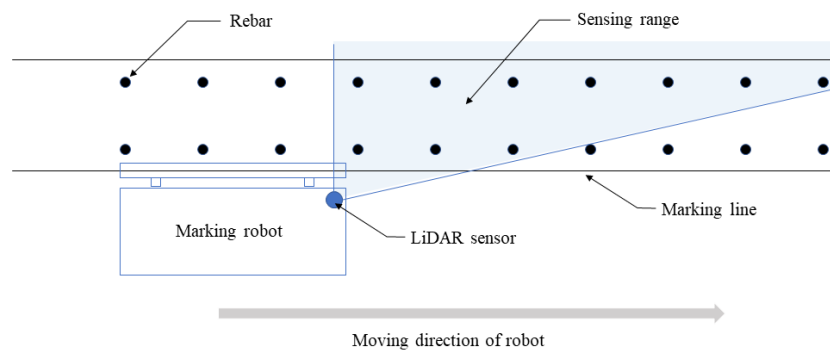


Figure 2. Sensing Process of Rebars Using 2D LiDAR Sensor



3. LiDAR 센서를 활용한 철근 인식 실험

3.1 실험 개요

우선, 2D LiDAR 센서 기기를 활용하여 철근 인식 목적으로의 활용 가능성 여부를 실험하였다. 이를 위하여 Table 1과 같

이 사양상 차이가 있는 2종류의 센서를 선정하여 측정거리별 평균 오차와 철근 두께에 따른 측정가능 거리를 실험하였다. 첫 번째로, 상대적으로 각 분해능(angular resolution)이 낮은 센서(RPLIDAR A2)를 통해 실내에서 실험한 결과 측정거리가 증가할수록 측정 오차가 급격히 증가하였으며, 측정 물체의 직경이 10mm인 경우 측정거리가 50cm를 넘어가면 측정이 제대로 이루어지지 않음에 따라 본 연구 목적으로의 활용 가능성이 떨어질 것으로 판단되었다. 이에 각 분해능이 0.33°인 센서(TiM561)를 활용하여 실내에서 동일한 실험을 진행하여 철근 인식 및 오차 측정을 위한 적용 가능성을 확인하였다.

Table 1. Specifications on LiDAR Sensors

Specifications	Description	
	RPLIDAR A2 [13]	TiM561 [14]
Product photo		
Weight	190g	250g
Minimum angular resolution	0.45°	0.33°
Working range	0.2m~12m	0.05m~10m
Angular range	360°	270°
Scanning frequency	10Hz	15Hz

앞선 실험을 통해 선정된 센서 기기(TiM561)를 활용하여 실제 현장에서 측정 거리와 철근 두께별 측정 오차 파악을 위한 실험을 진행하였다. 본 실험의 목적은 실제 현장에서의 측정 신뢰도 및 활용 가능성을 파악하기 위한 것으로, 충청남도 아산시에 위치한 공동주택 신축공사 현장 내 1개 동(지상 13층 골조공사)에서 진행되었다(Figure 3 참조).

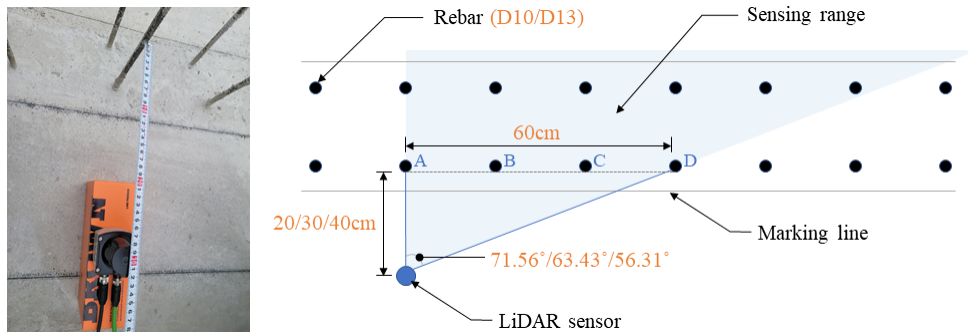


Figure 3. Experimental Settings and Photo in a Field Test

우선 측정거리의 경우, 벽체 철근의 일반적인 피복두께와 설계된 먹매김 로봇 구동부 측면까지의 거리를 고려하여 벽이 음철근 표면에서 라이다 센서 중앙부까지의 거리를 각각 20cm, 30cm, 40cm로 설정하였다. 각 거리에 따른 측정 각도는 설계된 로봇의 1회 마킹길이를 고려하여 1회 측정범위를 60cm로 하였을 때를 기준으로 설정하였으며, 이에 따라 측정 거리에 따른 측정 각도는 71.56°(거리 20cm), 63.43°(거리 30cm), 56.31°(거리 40cm)로 고정하였다. 철근 두께별 측정 오차를 파악하기 위하여 직경이 10mm와 13mm인 이음철근을 대상으로 측정하였으며, 향후 적용성을 고려하여 각 측정 주기는 2초

(10Hz 기준)로 짧게 하여 각 지점에서 측정된 데이터의 평균값을 적용하였다. 측정 높이는 바닥면에서부터 10cm 높이에서 측정하는 것으로 고정하였다. 또한, 향후 측정된 데이터 중 철근 데이터만을 추출하기 위한 방안을 테스트하였다.

3.2 실험 결과

우선, 각 분해능이 0.33°인 센서(TiM561)를 활용하여 실내에서 측정 거리에 따른 오차를 측정한 결과는 Table 2와 같다. 측정 오차는 최소 1mm에서 최대 25mm까지 평균 약 10.7mm의 오차가 발생하였으나, 측정 거리의 증가에 따른 오차가 비례적으로 증가하는 경향성을 보이지 않았다. 또한, 대부분 벽체 수직 이음철근의 직경이 10~13mm인 점을 고려하여 10mm 철근을 대상으로 측정하였을 때 약 1m 떨어진 거리에서도 인식에 문제가 없어 적용에 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 2. Error by Measurement Distance in a Laboratory Test

Actual distance(mm) (a)	Measured distance(mm) (b)	Error(mm) (c= a-b)
100	83	17
200	192	8
300	294	6
400	407	7
500	490	10
600	625	25
800	782	18
1000	985	15
1200	1199	1
1400	1387	13
1600	1607	7
1800	1801	1

실제 현장에서의 측정 신뢰도 파악을 위하여 진행된 실험 결과, 거리에 관계없이 측정 범위를 60cm로 고정하여 동일하게 4개의 철근(A~D, 철근간 간격 약 20cm)이 관측되었으며, 측정 오차 결과는 Figure 4와 같다. 또한 철근 직경에 관계없이 각 철근별로 최소 2개에서 최대 10개까지의 포인트가 관측되어 측정에 무리가 없는 것으로 파악되었으며, 2개의 포인트만 관측된 철근은 가장 외곽에 있는 철근으로 이는 측정범위상 철근의 일부만 측정되었기 때문으로 판단된다. 각 관측 포인트별로 2초간 측정된 20개 데이터의 평균값을 기준으로 하였으며, 철근 1개당 관측된 포인트(2~10개) 중 평균값이 가장 작은 포인트(센서 중앙부에서 철근 표면까지의 최단거리)를 기준으로 오차를 파악하였다.

동일한 직경의 철근을 대상으로 측정 거리에 따른 오차의 경향성은 뚜렷이 확인되지 않았으나, 10mm 철근의 경우 13mm 철근에 비해 동일한 위치의 철근에서 관측된 오차가 측정 거리별로 비교적 유사하게 나타났다. 또한, 측정 거리에 관계없이 10mm 철근에서 발생된 오차가 13mm 철근에 비해 전반적으로 낮은 경향을 보였다. 평균적으로 10mm 철근의 경우 4.75~7.75mm, 13mm 철근의 경우 9.75~11.15mm의 오차가 발생하였다. 이러한 차이는 줄자로 실제 거리를 측정하는 방식으로 인해 직경이 더 큰 13mm 철근의 경우 상대적으로 최단 거리의 측정이 부정확할 수 있었기 때문으로 사료된다. 일반적으로 10mm 철근이 벽체에 적용되기 때문에 5mm 내외의 측정 오차는 신뢰할 만한 수준이며, 거리에 따른 편차 또한 크지 않기에 현장 적용에 무리가 없을 것으로 판단되었다.

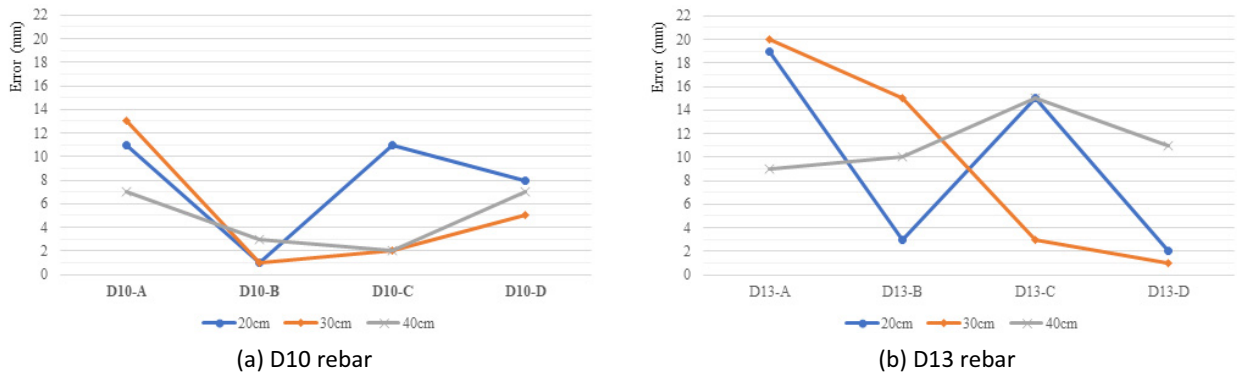


Figure 4. Error by Measurement Distance and Rebar Diameter in a Field Test

전체 센싱 영역 중 철근 데이터만을 추출하기 위하여 다음과 같은 절차를 수행하였다. 우선 각 관측 포인트(P: 각 포인트 별로 1~n의 값)별로 측정된 20개 데이터의 평균값(D)을 측정각도(θ)를 반영하여 센서와의 수직거리값(VD)으로 변환하였다(Figure 5 참조). 이 때, 각 관측 포인트별 측정각도는 센서의 분해능값이 0.33°이므로 식 (1)과 같이 산정되며, 수직거리는 식 (2)와 같이 산정 가능하다. 변환된 수직거리값 중 최소값을 기준으로 해당 값보다 +50mm 이내인 값만을 대상으로 하여 철근 데이터 여부를 파악하였으며, 그 결과 측정된 4개의 철근에 해당하는 데이터들을 제외하고는 모두 제거되어 방어의 적정성을 확인하였다. 센서와 인식해야할 철근 사이에는 일반적으로 별도의 장애물이 없기에 센서와의 수직거리를 기준으로 가장 작은 값을 철근으로 볼 수 있으며, 철근별 배근 위치 오차를 고려하더라도 일반적인 벽체 두께(200~250mm)와 피복두께를 감안할 때 최소값을 기준으로 50mm보다 큰 값은 해당 부위의 철근이 아닌 뒷 열에 배근된 철근이나 다른 물체로 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

$$\theta_n = P_n \times 0.33 \tag{1}$$

$$VD_n = D_n \times \cos(\theta_n) \tag{2}$$

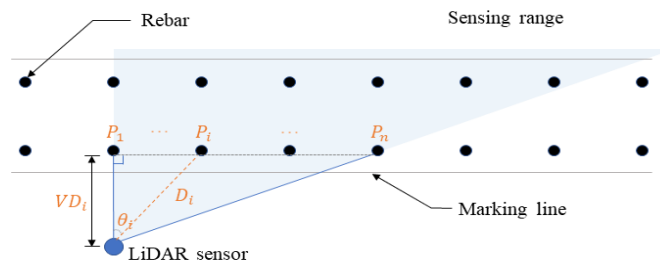


Figure 5. Vertical Distance Conversion of Measured Data

4. 철근배근 오차 측정 및 먹매김 판단 프로세스

4.1 철근 오차측정 프로세스

앞선 실험 결과를 바탕으로 마킹로봇과 2D LiDAR 센서를 연동한 철근배근 오차 측정 프로세스를 제시하고자 한다. 우선 LiDAR 센서는 로봇의 마킹부가 위치한 측면의 전면부에 배치되며, 센서의 측정각도(θs)는 로봇의 정지 위치에 따라 센서

와 먹선과의 거리가 일정하지 않으므로, 마킹부와 직각을 이루는 지점을 측정 시작 각도로 하여 적정 각도를 사전에 설정하도록 한다. 로봇이 정지하는 위치는 센서로부터 측정해야 하는 철근과의 거리가 대부분 20~40cm 정도가 될 것으로 예상되므로, 현재 개발된 로봇의 1회 마킹 길이(약 50cm)를 고려할 때 60~70°정도가 적정할 것으로 판단된다.

센서는 로봇이 정지하여 로봇의 위치(x_r, y_r), 각도(θ_r) 등의 정밀자세를 확인한 직후 일정시간(1~2초 내외) 정도만 활성화 되도록 하여 센싱을 진행한 후, 각 관측 포인트별로 평균값을 계산하도록 한다. 또한, 로봇의 위치 좌표를 기준으로 센서의 위치 좌표(x_s, y_s)를 계산하며, 사전에 입력된 먹 도면 좌표를 토대로 해당 위치의 센서로부터 먹선까지의 거리(D_{ml})를 산정한다.

다음으로는 각 관측 포인트별 계산된 평균값을 먹선과의 수직거리 값으로 변환하도록 한다. 변환시 앞서 제시된 식 (1)로부터 로봇이 먹선과 이루는 각도(θ_r)를 고려하여 각 포인트의 각도(θ_n)를 보정하도록 한다. 이후 철근 데이터만을 추출하기 위하여 수직거리 값 중 최소값을 기준으로 +50mm 이내의 값만을 남기도록 한다. 또한 로봇에 설치시 센서로부터 먹선까지의 거리(D_{ml})를 산정할 수 있으므로, 철근 데이터 추출을 위한 대안으로 D_{ml} 과 해당 벽체 두께의 1/2을 합한 값보다 작은 수직거리 값만을 남기는 방식을 채택할 수 있다. 이를 통해 철근별 최소 1개 이상의 수직거리 데이터를 추출하게 된다. 이후 각 철근별 수직거리 값 중 최소값을 추출한 후 센서와 먹선과의 거리인 D_{ml} 과의 차를 계산하여 철근별 피복두께를 산정한다 (Figure 6 참조).

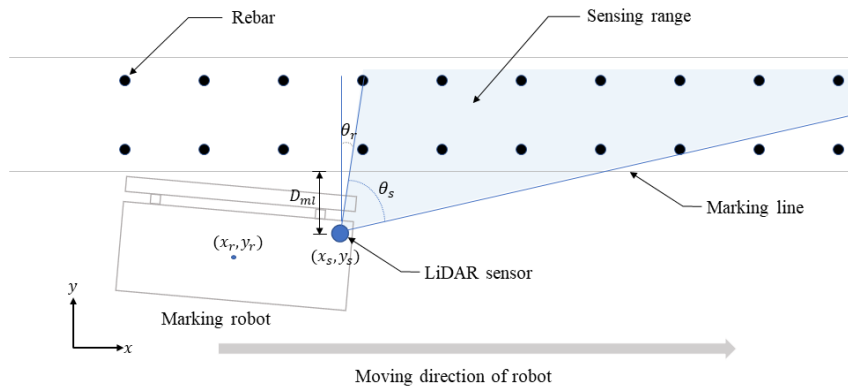


Figure 6. Measurement of Rebar Position Error

4.2 먹매김 판단 프로세스

측정된 철근배근의 피복두께를 기준으로 하여 먹매김의 수행여부를 판단하는 프로세스를 제시하였다. 먹매김 수행여부의 기준은 건축법에 따른 허용오차를 기준으로 설정하였다. 철근의 위치에 따른 판단기준은 Figure 7과 같다.

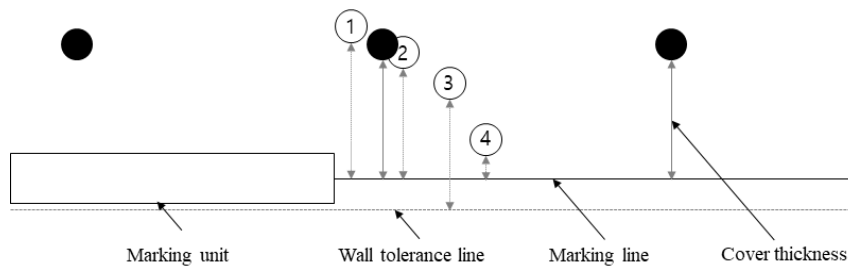


Figure 7. Marking Judgment by Rebar Position

철근이 ①에 위치에 있을 경우는 원래위치보다 안쪽에 위치한 경우로, 피복두께 확보와 함께 먹매김 수행이 가능하기 때문에 철근의 오차만 측정하면 된다. 철근이 ②에 위치에 있을 경우는 피복두께의 허용오차범위인 10mm 이내에 위치한 경우로, 철근의 수정이 필요하나 먹선의 보정은 필요하지 않다. 따라서 철근 오차를 측정하고 먹매김은 그대로 수행한다. 철근이 ③에 위치에 있을 경우는 피복두께의 허용오차인 10mm를 넘어가나 벽체의 허용오차범위(벽체 두께의 3%)내에서 벽체두께를 수정하였을 경우 피복두께의 허용오차 범위 내에 있는 경우이다. 해당 경우는 벽체먹선의 수정을 통해 피복두께 확보가 가능하므로 두께가 늘어난 보정된 먹선을 수행한다. 철근이 ④에 위치에 있을 경우는 철근이 마킹부 안쪽에 위치하여 간섭으로 인해 마킹이 불가능 하므로 먹매김을 수행하지 않고 다음 마킹지점으로 이동한다. 철근과 먹선의 모든 측정데이터는 검측을 위해 위치별로 수집하여 보고한다.

본 프로세스를 마킹 로봇에 적용하기 위해 현장 전문가 2명의 인터뷰를 수행하였다. 인터뷰 결과 본 프로세스는 철근의 피복두께를 시공오차로 인한 변위별로 구분하여 이음철근의 수정과 변위에 따른 먹매김 보정이 가능할 것으로 판단하였다. 다만 수정이 필요한 부분으로, 철근이 ③에 위치에 있어 벽체의 먹선을 수정하는 방식은 마감품질 확보를 위해 현장에서는 선호하지 않으며 일반적으로 철근을 수정하는 방식을 고려한다고 하였다. 또한 먹선 보정을 위해서는 철근측정의 오차가 먹선의 허용오차인 3mm 이내로 측정되어야 하기 때문에 결과적으로 보정된 먹선을 그리는 방식보다는 해당 부분의 철근의 오차 및 먹선 보정 가능여부를 보고하는 방식으로 수정하였다. 전문가 인터뷰를 바탕으로 수정한 먹매김 판단 프로세스는 Figure 8과 같다.

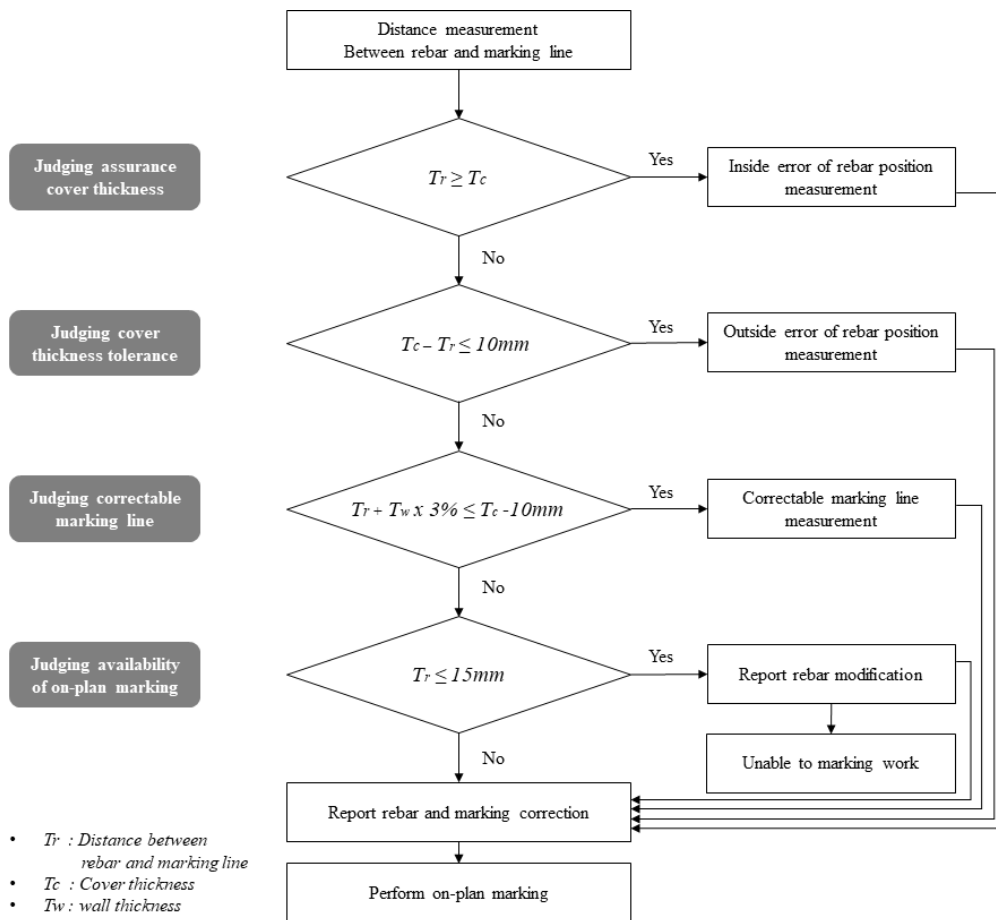


Figure 8. Marking Judgment Process

첫 번째 단계는 피복두께를 확보하였는지 판단하는 단계로, 피복두께(T_c)보다 철근과 먹선과의 거리(Tr)가 큰 경우 철근의 안쪽의 오차만을 측정해서 먹매김을 수행한다. 두 번째 단계는 Tr 이 철근의 피복두께의 오차범위 내에 있는지를 판단하는 단계로, 피복두께의 10mm 이내에 위치할 경우 철근의 바깥쪽의 오차를 측정해서 먹매김을 수행한다. 세 번째 단계는 벽체선을 보정하여 피복두께를 확보할 수 있는지를 판단하는 단계로, 벽체두께의 3%를 늘린 먹선으로부터 10mm 이내에 위치할 경우 보정선의 위치를 측정하여 보고한 후 먹매김을 수행한다. 해당단계에 생성된 먹선과 철근의 보정위치 데이터는 관리자에게 전달되어 추후 먹선 보정여부를 판단하게 한다. 마지막으로 먹매김 수행이 가능한지 판단하는 단계로, 마킹유닛의 내부에 철근이 간섭되는지를 판단한다. 이에 Tr 이 15mm 이내에 위치하면 철근이 마킹유닛의 중심을 넘어가기 때문에 공간적으로 간섭되어 마킹이 불가능하다. 따라서 이 경우 철근의 위치를 보고한 후 먹매김을 수행하지 않고 다음 작업지점으로 이동한다. 본 프로세스를 통해 마킹 로봇은 철근의 시공상 오차를 범위별로 판단하여 피복두께 확보를 위한 철근의 보정여부와 먹매김의 수행여부를 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마킹 로봇을 이용한 골조공사 먹매김 자동화를 위하여 LiDAR 센서를 이용한 철근 배근오차 측정 및 먹매김 판단 방안을 제시하였다. 철근 인식에 적절한 성능을 지닌 센서를 선정하였으며, 실제 현장에서 측정 거리와 철근 두께별 측정 오차 파악 실험을 진행한 결과 철근 인식 및 배근 오차 측정이 가능할 것으로 파악되었다. 또한, 측정 데이터를 토대로 철근 데이터만을 추출하기 위한 적정 방안을 제시하였다. 마지막으로 마킹 로봇 연동을 고려하여 철근 배근오차 및 피복두께를 산정하는 방안과 먹매김 판단을 위한 수정 프로세스를 제안하였다.

본 연구의 일반적인 공동주택의 벽체철근인 10mm, 13mm를 대상으로 하였기 때문에 다양한 철근을 인식할 수 있는 추가적인 실험이 필요하며 측정 및 판단을 위한 알고리즘으로 실제 먹매김 로봇의 운영시스템과의 연동이 요구된다. 향후 연구에서는 실제 센서를 로봇에 부착하여 본 연구의 제안된 알고리즘을 먹매김 로봇의 주행 및 먹매김 수행시스템과 연동하여 효과를 검증할 예정이다. 본 연구결과는 개발 중인 먹매김 로봇의 효율성 및 성능 향상에 기여할 뿐 아니라 먹매김 자동화 기술 도입을 통해 골조의 정확도 향상될 것이 기대되며 로봇이 먹매김 판단을 통해 관리자 없이 스스로 수행하여 관리의 효율성도 향상될 것으로 기대된다.

요약


먹매김 로봇은 허용오차 이내의 정밀도를 확보하는 것이 매우 중요하다. 그러나 골조공사는 시공과정에서 철근배근의 변위가 빈번하게 발생하며, 해당오차는 먹선이나 철근위치의 수정을 요구한다. 먹매김 로봇은 정밀도 확보 및 자동화를 위해 철근의 오차를 측정하고 먹선과 철근의 수정을 스스로 판단할 수 있어야 한다. 이에 본 연구는 LiDAR 센서를 통한 철근배근의 오차 측정방안과 이를 바탕으로 먹매김 판단 프로세스를 제시하였다. LiDAR 센서를 활용한 철근인식 실험결과 평균적으로 5mm 내외의 오차를 발생하였으며, 이는 일반적으로 벽체에 적용되는 철근 수준에서 인식을 신뢰할만한 수준으로 나타났다. 또한 철근오차를 범위별로 판단하여 철근의 보정여부와 먹매김의 수행여부를 로봇이 스스로 판단할 수 있는 프로세스를 제시하였다. 본 연구결과는 시공오차를 고려한 먹매김로봇의 자동운영에 기여할 수 있으며 이를 통해 골조품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.


키워드 : 먹매김 자동화, 마킹로봇, 철근배근 오차, 먹매김 판단, 라이다 센서


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

Taehoon Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-2869-0061>

Hyunsu Lim,  <http://orcid.org/0000-0002-3364-5118>

Kyuman Cho,  <http://orcid.org/0000-0001-5008-110X>

References

1. Kim TH, Lim HS, Cho KM. 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>
2. 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 Jun 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>
3. 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>
4. 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>
5. Lim HS, Cho KM, Kim, TH. 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>
6. Construction guidelines for rebar work [Internet]. Goyang (Korea): Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology; 2022 Nov 21. Available from: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConWrkDtlSch.do?gubun=tch&pMetaCode=CIGCEI210162>
7. KDS 14 20 50: Design Criteria for Rebar Details of Concrete Structures [Internet]. Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2022 Nov 21. Available from: <https://www.kcsc.re.kr/StandardCode/Viewer/41005>
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Enforcement regulation of building act [Internet]. Seoul (Korea): Korea Law Information Center; 2022 Nov 21. Available from: <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?efYd=20220211&lsiSeq=240383#J14934155>
9. Masri EE, Waters T, Ferguson N. Guided wave inspection of bars in reinforced-concrete beams using surface-mounted

- vibration sensors. *Vibration*. 2020 Sep;3(4):343-56. <https://doi.org/10.3390/vibration3040023>
10. Jin J, Zhang W, Li F, Li M, Shi Y, Guo Z, Huang Q. Robotic binding of rebar based on active perception and planning. *Automation in Construction*. 2021 Dec;132:103939. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103939>
 11. Kim MK, Thedja JPP, Wang Q. Automated dimensional quality assessment for formwork and rebar of reinforced concrete components using 3D point cloud data. *Automation in Construction*. 2020 Apr;112:103077. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103077>
 12. 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 ICCEPM 2022 Organizaing Committee; 2022. p. 312-8.
 13. RPLIDAR A2: Key Parameters [Internet]. Shanghai (China): Shanghai Slamtec Co., Ltd.; 2022 Mar 18: Available from: <https://www.slamtec.com/en/Lidar/A2Spec>
 14. 2D-LiDAR sensor: TiM [Internet]. Seoul (Korea): Sick Korea; 2022 Apr 22: Available from: <https://www.sick.com/kr/ko/products-by-tasks/position-determination/position-determination/2d-lidar-/tim/c/g570093>