

거더원격정밀거치를 위한 LiDAR 기반의 상대위치 추정 방법에 관한 연구

김경민, 이상윤, 박영수*
한국건설기술연구원 구조연구본부

Study on the Relative Position Estimation Method with LiDAR for Remote Precision Installation of Bridge Girders

Kyung-Min Kim, Sang-Yoon Lee, Young-Soo Park*

Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 교량의 건설 공정에는 불가피하게 고소 위치에서 이루어져야 하는 작업이 포함되며, 이로 인해 작업자가 안전사고에 쉽게 노출된다. 또한, 인구 감소에 따른 전문 인력의 감소로 반복 작업에서의 시공 품질 확보에 대한 우려가 증가하고 있다. 이에 대한 해결책으로 건설용 로봇을 이용한 원격 건설 기술이 개발되고 있다. 이 연구에서는 교량의 시공과정 중 거더의 원격거치를 위해 개발된 원격정밀거치로봇에 적용할 수 있는 거더의 최종 거치 위치에 대한 상대위치를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 연구에서 제안하는 상대위치 추정 방법은 LiDAR(light detection and ranging)와 2개의 마커로 구성되며, LiDAR로 수집된 포인트 클라우드를 누적하여 마커간의 중심을 추정하는 방법으로 상대위치를 추정한다. 제안한 방법에 대한 검증은 위해 야외에 설치된 거더에 대해 검증 실험을 수행하였으며, 상대위치 추정 오차를 줄이기 위한 최적의 포인트 클라우드 데이터 누적 횟수를 결정하였다. 원격정밀거치로봇 시제품에 제안한 방법을 적용하여 실제 시공 현장을 모사한 상황에 대해서도 추가적인 검증 실험을 수행하였다. 검증 수행 결과, 이 연구에서 제안한 상대위치 추정 방법이 원격정밀거치로봇에 적용가능함을 확인하였다. 이 연구에서 제안한 상대위치 추정 시스템을 적용하면 교량 건설현장에서의 산업재해를 줄일 수 있을것으로 기대된다.

Abstract The construction process of bridges inevitably involves work at elevated sites, leading to an increased risk of severe accidents for workers. In addition, there are problems such as a decrease in specialized workers caused by a decreasing population in South Korea. To overcome these problems, remote construction technology using construction robots is being developed. This study proposes a method for estimation of the relative position between precast girders and piers or abutments, which could be applied to a remote robot developed for precise installation in bridge construction. The method consists of LiDAR (light detection and ranging) and two markers. Point clouds are acquired with LiDAR to estimate the centers between markers and calculate their relative positions through distances from the centers. An experiment was conducted to confirm the usability and accuracy of the proposed method in outdoor conditions. The usability of the proposed method was confirmed, and the optimal number of cumulative data was selected. The method was applied to a manufactured prototype to verify its accuracy, and areas requiring improvement were identified. The proposed method could greatly contribute to reducing industrial accidents at bridge construction sites.

Keywords : Smart Construction, Remote Construction Technology, Remote Precision Installation Robot, Relative Position Estimation Method, Remote Bridge Construction

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가 R&D 사업(과제번호 RS-2020-KA157074)”의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Soo Park(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: youngsoopark@kict.re.kr

Received July 17, 2023

Revised August 8, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

대부분 교량의 시공은 미리 제작한 거더를 인양하여 교대 또는 교각에 거치하고 바닥판을 설치하는 방법으로 이루어진다. 교량 현장 인근에서 미리 제작한 거더는 현장에서 운반되고, 운반된 거더를 두 대의 크레인으로 인양하여 교대나 교각 위에 거치시킨다. 이 과정에서 거더를 교량 받침 위에 정밀하게 거치하기 위해 작업자가 직접 교대/교각 위에서 작업을 진행한다. 하지만, 교대/교각 위와 같이 고소 위치에서 이루어지는 작업으로 인해 시공 과정 중 작업자가 낙상, 끼임 등의 사고 위험에 쉽게 노출될 수 있다. 또한, 거더를 설치하는 작업은 작업자의 전문성에 따라 시공 정확도의 차이가 발생하는데, 최근 인구 구조의 변화에 따라 전문 인력도 감소하고 있는 추세로 시공 품질 확보에 대한 우려도 중요한 이슈가 되고 있다.

최근에는 교량 시공 현장과 같이 안전사고의 위험이 높은 건설 현장에서 작업자의 안전과 시공 품질을 확보하기 위해 인력 중심의 산업구조에서 기술 집약적인 산업구조로 변화시키고자하는 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 그 중 하나는 로봇 산업의 접목이다. 현재 건설 산업 분야에서는 교량 바닥판 모니터링[1,2], 케이블 교량의 케이블 손상 모니터링[3,4], 무인체를 이용한 수면 아래의 교각 모니터링[5,6] 등과 같이 시공보다는 구조물의 유지관리 및 모니터링 분야에 주로 활용되고 있다.

그 외에도 건설용 로봇을 개발하여 고소 현장과 같이 위험한 현장에서의 작업이나 반복되는 작업에 대하여 인력을 대체하는 기술이 연구되고 있다. 특히, 산업용 로봇을 이용한 벽체 구조물 조립 로봇[7,8], 3D 프린터를 이용한 콘크리트 구조물 시공[9,10], 철근망 조립[11], 부품 조립[12], 이음부 접착제 주입[13], 그리고 벽체 도색[14] 등 실제 시공 현장에 개발한 로봇 건설 기술을 적용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 하지만, 아직까지는 교량의 시공 현장의 전반적인 과정에 적용하기보다는 일부 과정만을 대체하고 있다.

본 연구는 교량 건설 현장에서 거더의 정밀거치를 위해 교각이나 교대에 투입되는 인력을 대체할 수 있는 원격정밀거치로봇을 개발하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 기존에 연구자들이 제작한 원격정밀거치로봇의 시작품[15]에 거더를 정밀거치하기 위해 인력의 투입과 외부 환경의 영향을 최소화할 수 있는 시스템과 방법을 고려하였으며, 상대 오차 $\pm 3\text{mm}$ 이내를 목표로 하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 LiDAR와 크기를 알고

있는 구형 마커 2개로 구성된다. 본 연구에서는 제안한 방법의 타당성 검증을 위한 실험을 수행하였으며, 원격정밀거치로봇 시작품에 적용하여 적용성과 정확성 등을 검증하였다.

2. 원격정밀거치로봇

2.1 원격정밀거치로봇의 구성

원격정밀거치로봇은 프리캐스트 거더를 들어올려 교각 또는 교대 위에 정밀하게 거치하는 것을 목적으로 개발된 장비이며, Fig. 1과 같이 구성된다. 원격정밀거치로봇은 거더를 인양할 수 있는 인양용 유압잭과 거더 거치 위치를 미세하게 조절할 수 있는 매니퓰레이터 시스템으로 구성된다. 매니퓰레이터 시스템은 수직 위치 조절을 위한 수직 유압잭과 수평 위치 조절을 위한 수평 유압잭으로 구성된다. 거더정밀거치를 위한 상대위치 추정 결과값은 지상에 위치한 원격제어시스템으로 전송되며, 원격제어시스템에서 매니퓰레이터 시스템으로 상제위치를 조정하기 위한 명령을 전송한다.

원격정밀거치로봇을 이용한 거더정밀거치 과정은 Fig. 2와 같다. 운반된 거더 양 끝에 원격정밀거치로봇을 설치하고, 인양용 유압잭에 거더를 연결한다. 이후 두 대의 다중 협업 크레인을 이용하여 원격정밀거치로봇을 인양 후 교대/교각까지 이동시킨다. 거더 이동 후 매니퓰레이터 시스템의 수직 유압잭의 스트로크를 늘려 교대/교각 상면에 약 2 tonf의 지압력으로 접지하고, 수평 유압잭을 사용하여 거더의 위치를 정밀하게 조정하고 거더를 교대/교각 받침부에 거치한다. 거더 거치가 완료되면 수직 유압잭을 조절하여 접지된 매니퓰레이터에서 지압력을 제거하고, 원격정밀거치로봇의 인양용 유압잭에서 거더를 분리하면 작업이 종료된다.

거더를 교대/교각 위에 정밀하게 거치하기 위해서는 교대/교각의 받침과 인양된 거더 사이의 상대위치 측정이 중요하다. 기존에는 거더와 받침의 상대 위치 측정을 위해 작업자가 직접 고소 현장에서 작업을 진행하였으며 이로 인해 사고 노출이 빈번하였다. 그러나 원격정밀거치로봇은 받침과 거더 사이의 상대위치를 로봇이 측정하여 원격제어시스템으로 전송하고, 전송된 상대 위치를 기반으로 매니퓰레이터를 조정하여 거더를 정확한 위치에 거치시키므로 교량 건설 현장에서 발생할 수 있는 낙상 사고를 예방할 수 있다.

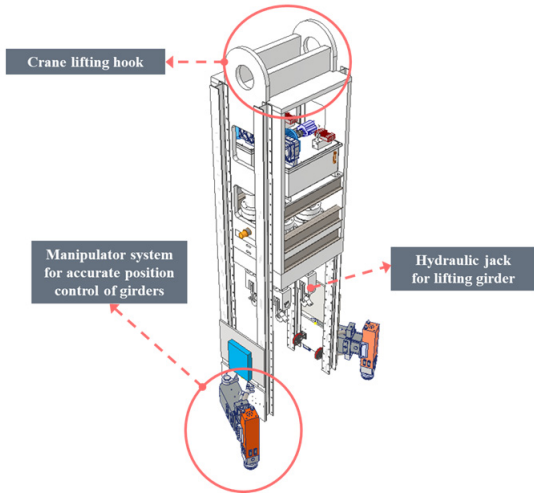


Fig. 1. Remote precision installation robot

2.2 상대위치 추정 방법 제안

이 연구에서 거터와 교대/교각의 상대위치 추정을 위해 제안된 방법은 LiDAR와 크기를 알고 있는 2개의 마커를 사용한다. 마커의 형상은 각각 반구와 1/4 구 형태이며, 반구 형태의 마커는 교대/교각의 받침부 근처 상면에 설치하여 기준점으로 사용한다. 기준점 설정을 위해 교대/교각의 받침과 반구 마커의 중심까지의 거리를 확인한다. 1/4 구는 정밀거치로봇에 설치하며, LiDAR는 2개의 마커 근처 포인트 클라우드를 수집할 수 있는 위치에 설치한다. 본 연구에서는 원격정밀거치로봇과 받침의 상대위치 추정 허용오차를 $\pm 3 \text{ mm}$ 로 설정하였다.

상대위치를 추정하는 과정은 Fig. 3과 같다. 교대/교각의 받침 근처 상면과 정밀거치로봇에 각각 반구와 1/4 구 형태의 마커를 설치한 후 LiDAR를 통해 마커 주변의 포인트 클라우드를 수집한다. 수집된 포인트 클라우드에서 각각의 마커에 해당하는 포인트 클라우드만을 추출하

고, 추출된 포인트 클라우드에서 각 마커의 중심위치를 추정한다. 마커의 중심위치($f(C)$)는 Eq. (1)로부터 추정 가능하며, 최적화기법(fminsearch, matlab[16])을 이용한다.

$$f(C) = \sum_{n=1}^n [r^2 - \{(x_{p.c} - x_c)^2 + (y_{p.c} - y_c)^2 + (z_{p.c} - z_c)^2\}] \quad (1)$$

Where, n denotes the number of point cloud data; r denotes radius of the marker; $x_{p.c}$, $y_{p.c}$, and $z_{p.c}$ denote coordinate of the point cloud; x_c , y_c , and z_c denote coordinate of the center, respectively.

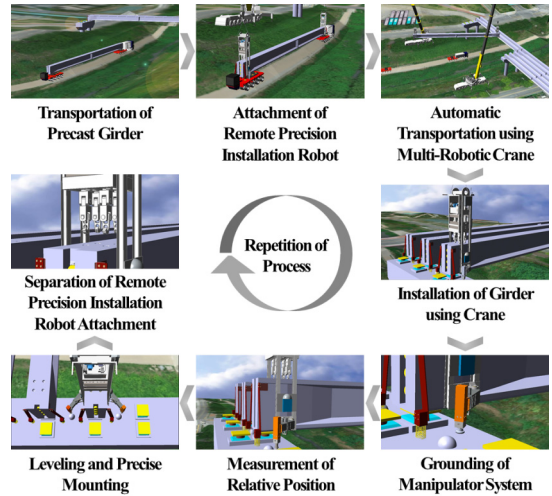


Fig. 2. Procedure of girder installation using remote precision installation robot

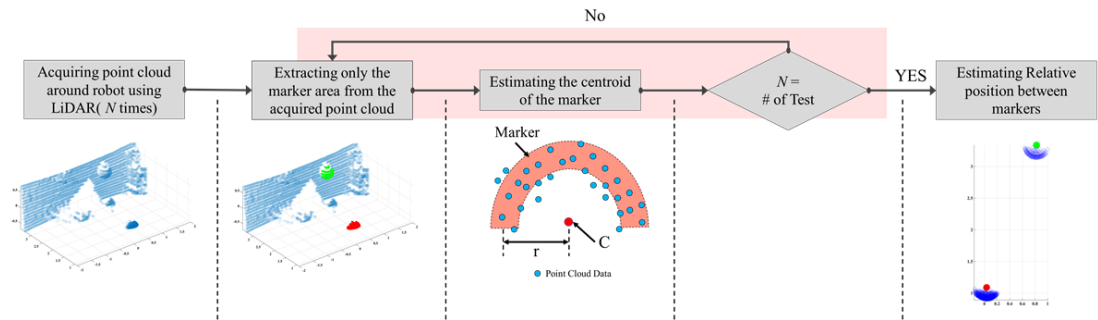


Fig. 3. Procedure of relative position estimation

3. 상대위치 추정 방법 검증

3.1 상대위치 추정 방법 검증 및 최적의 포인트 클라우드 데이터 누적 횟수 결정

본 연구에서 제안한 상대위치 측정 방법을 위해 검증 실험을 수행하였다. 검증 실험은 기존 단선 철도를 복선화하기 위한 현장의 야외 제작장에서 수행하였다.

실험에 사용된 거더는 높이 3 m, 길이 40.5 m의 강 거더이다. 검증 실험에 사용한 마커는 투명 아크릴로 제작하였으며, 직경 400 mm의 반구와 1/4 구 형태로 제작하였다. LiDAR는 Puck Hi-res(Velodyne)를 사용하였으며 상세 성능은 Table 1과 같다. 반구 형태의 마커는 기준점으로 활용하기 위해 지표면에 설치하였으며, 1/4 구 형태의 마커는 강거더에 설치하였다. LiDAR는 지표면과 거더에 설치한 두 마커 근처의 포인트 클라우드 수집을 위해 거더 상부에 설치하였다. 이 때, 투명 아크릴로 제작한 마커는 LiDAR로 포인트 클라우드 측정 시 반사에 의해 수집되는 포인트 클라우드 데이터에 오차가 발생하지 않도록 스프레이를 사용하여 표면 처리를 하였다. 설치 상세 모습은 Fig. 4와 같으며 수집된 포인트 클라우드는 Fig. 5와 같다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 LiDAR의 정확도는 ± 3 cm이므로 설정한 목표인 상대위치 추정 허용오차 ± 3 mm를 달성하기 위하여 LiDAR와 마커를 고정시킨 상태에서 반복적으로 포인트 클라우드 데이터를 수집하였다. 그리고 수집된 포인트 클라우드를 중첩시켜 상대위치 추정의 정확도를 확보하고자 하였다.

Table 1. Specification of LiDAR (Puck Hi-res, Velodyne [17])

Measurement Range	100 m
Range Accuracy	Up to ± 3 cm
Field of View(Vertical)	+15° ~ -15°
Angular Resolution(Vertical)	2.0°
Field of View(Horizontal)	360°
Angular Resolution (Horizontal/Azimuth)	0.1°
Rotation Rate	5 Hz ~ 20 Hz

최적의 포인트 클라우드 데이터 누적 횟수를 결정하기 위해 데이터의 누적 횟수에 따른 마커 중심위치 추정 오차를 평가하였다. 포인트 클라우드 데이터는 2 초/회의 수집 속도로 총 250회 수집하였다. 수집된 250개의 데이터 중 무작위로 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, 125, 그리고 150개의 데이터를 선정하여 각 마커의 중

심을 추정하였다. 추정하는 과정은 20회씩 반복 수행하였으며 추정 결과는 Fig. 6과 Table 2에 나타내었다.

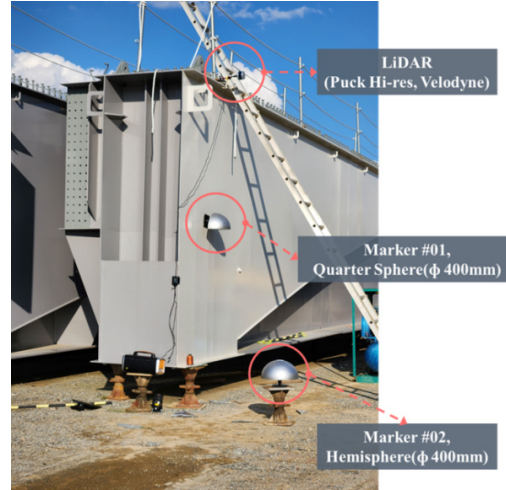


Fig. 4. Test setup for verification of relative position estimation method

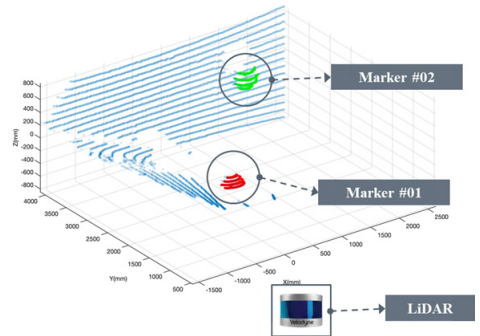


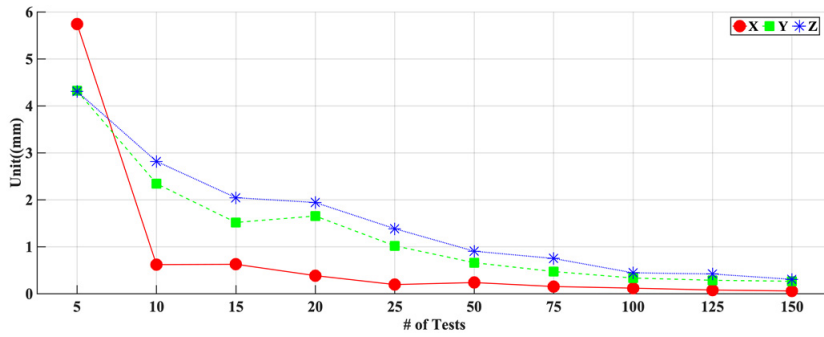
Fig. 5. Example of point cloud acquisition using LiDAR

Fig. 6과 Table 2에서 확인할 수 있듯이, 포인트 클라우드 데이터의 누적 횟수가 증가할수록 추정된 중심의 오차가 감소하였으며, 특히 데이터를 100회 이상 누적할 경우 중심위치가 수렴하였다. 뿐만 아니라, 100회 이상 누적할 경우 표준편차가 0.1 mm 이내였다. 그러나 데이터의 누적 횟수가 증가할수록 데이터 수집 시간(약 2 초/회)이 증가하며, 증가 횟수에 따라 연산 시간이 추가된다. 특히, 누적 횟수 25회와 100회의 수집 및 연산시간은 약 4배의 차이를 보인다. 따라서, 중심위치 추정을 위해 소요되는 연산과 수집 시간, 그리고 목표 허용 오차를 고려하여 최적의 포인트 클라우드 데이터의 누적 횟수를 25회로 결정하였다. 또한, 시작품을 활용한 검증 실험을 통해 본 연구에서 제안한 거더와 교대/교각의 상대위치 추정 방법의 가능성을 추가적으로 검증하였다.

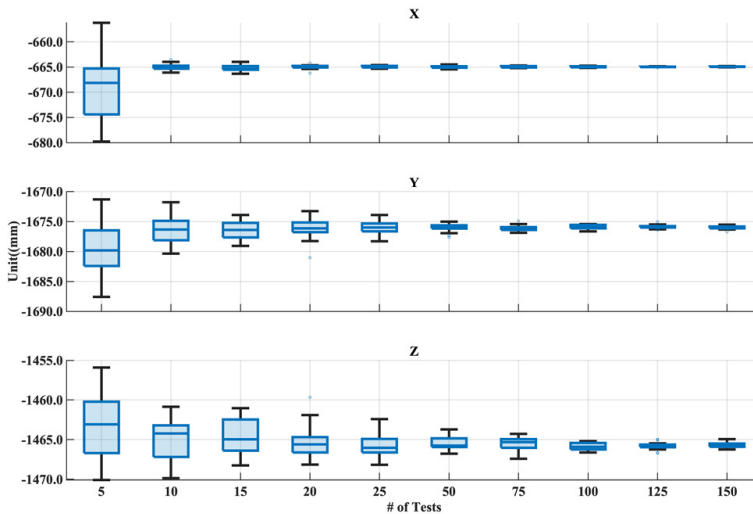
Table 2. Estimated center of each marker according to the number of data accumulation (unit: mm)

Marker #01											
The number of data accumulation		5	10	15	20	25	50	75	100	125	150
X	mean	-372.34	-372.28	-372.40	-372.40	-372.46	-372.41	-372.40	-372.45	-372.46	-372.43
	std	0.42	0.32	0.24	0.16	0.14	0.16	0.07	0.06	0.05	0.04
Y	mean	1902.97	1903.14	1903.02	1902.95	1902.92	1902.99	1902.99	1902.93	1902.92	1902.95
	std	0.43	0.41	0.29	0.17	0.16	0.15	0.09	0.08	0.06	0.05
Z	mean	111.75	111.31	111.63	111.78	111.43	111.33	111.27	111.60	111.57	111.43
	std	2.68	2.51	1.94	1.75	1.23	0.88	0.51	0.50	0.36	0.34

Marker #02											
The number of data accumulation		5	10	15	20	25	50	75	100	125	150
X	mean	296.78	292.76	292.79	292.58	292.50	292.56	292.56	292.51	292.51	292.50
	std	5.63	0.39	0.52	0.41	0.23	0.18	0.12	0.10	0.06	0.04
Y	mean	3582.52	3579.58	3579.46	3579.08	3578.95	3579.08	3579.12	3578.82	3578.81	3578.92
	std	4.43	2.39	1.62	1.74	1.06	0.73	0.52	0.38	0.32	0.28
Z	mean	1574.90	1576.26	1576.35	1577.11	1577.20	1576.75	1576.73	1577.46	1577.39	1577.15
	std	6.06	4.96	3.77	3.57	2.50	1.71	1.22	0.90	0.75	0.62



(a)



(b)

Fig. 6. Relative position estimation results according to the number of data accumulations (a) standard deviation (b) boxplot

3.2 원격정밀거치로봇 시작품을 이용한 검증 실험

원격정밀거치로봇 시작품을 이용하여 이 연구에서 제안한 상대위치 추정 방법의 적용성과 정확성을 검증하였다. 특히, 실제와 유사하도록 거더거치 현장을 모사하여 거더정밀거치 과정에서 발생하는 위치의 변화를 측정하였다. 검증 실험은 한국건설기술연구원 내 실험동에 설치된 크레인에 거더와 원격정밀거치로봇을 연결하여 수행하였다. 실험에 사용된 거더는 높이 1.4 m, 길이 30 m의 실제 교량용 거더를 11.1 m로 길이만 축소하여 제작한 것으로, 중량은 약 25 tonf이다. 실제 거더거치 운영은 두 대의 원격정밀거치로봇이 활용되지만, 본 검증 실험에서는 제작 일정 상 한 대의 로봇만을 사용하여 수행하였다. 원격정밀거치로봇이 설치되지 않은 거더의 반

대편 단부에는 Fig. 7과 같이 강봉을 이용하여 경계조건을 모사하였다.

검증 실험을 위해 원격정밀거치로봇 시작품에 LiDAR 1대와 직경 400 mm의 마커(1/4 구)를 설치하였고, 동일한 직경의 반구 형태의 마커는 실험실 바닥에 고정하였다(Fig. 7). 실험은 매니플레이터 시스템을 사용하여 거더를 종방향(x)과 횡방향(y)으로 원격정밀거치로봇과 거더를 이동시키면서 진행하였다. 또한 거더를 이동시키는 동안 LiDAR를 통해 로봇 주변의 포인트 클라우드 데이터를 각각 25회씩 수집하였다. 수집한 데이터에서 마커의 포인트 클라우드만 추출하고, 중첩시켜 마커의 중심위치를 추정하였다. 이후 추정된 마커 간의 중심위치로부터 상대위치를 추정하였다.



Fig. 7. Test setup for verification of relative position estimation method on remote precision installation robot prototype

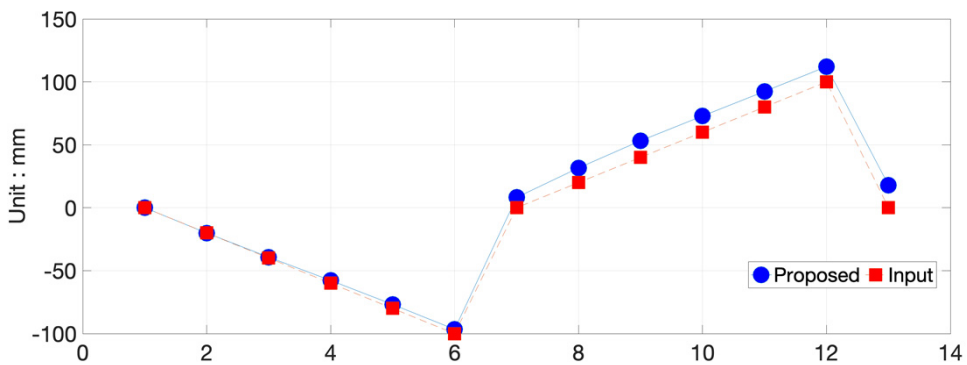


Fig. 8. Comparison of the input value and relative position estimation result (lateral direction)

Table 3. Comparison of the lateral direction movement input value and relative position estimation result (error, difference)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Estimation (mm)	0	-20.1	-39.2	-57.8	-76.8	-96.6	8.2	31.6	53.2	72.9	92.4	112.1	18
Input (mm)	0	-20	-40	-60	-80	-100	0	20	40	60	80	100	0
Error (%)	-	-0.5	2.0	3.7	4.0	3.4	-	-58.0	-33.0	-21.5	-15.5	-12.1	-
Difference (mm)	-	-0.1	0.8	2.2	3.2	3.4	-	11.6	13.2	12.9	12.4	12.1	-

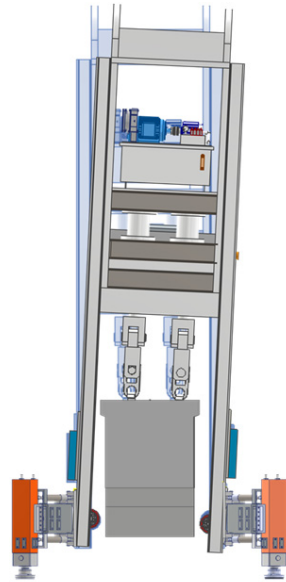


Fig. 9. Causes of errors in relative position estimation results

종방향 이동은 임시로 교량 받침을 모사하기 위해 설치한 강봉의 마찰력에 의하여 원격정밀거치로봇의 이동이 제한되어 정확한 값을 비교할 수 없었다. 횡방향 이동 결과는 Fig. 8, Table 3과 같다. 횡방향 이동 시, 입력값이 원점인 0 mm 에서 -100 mm 까지의 추정 값은 입력 값 대비 5%의 미만의 오차를 보였으나, 다시 원점으로 돌아온 후 반대 방향으로 이동하면서 오차가 크게 발생하였다. 이 때, 원점에서 +100 mm까지의 입력값과 추정값의 차이는 일정한 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같이 원점 복귀 이후 발생한 일정한 오차는 원격정밀거치로봇이 원점으로 복귀하는 과정에서 틀어짐이 발생하고, 이로 인하여 로봇에 설치된 LiDAR와 마커의 초기값이 변화되어 발생한 것으로 판단된다(Fig 9). 따라서 추정값의 정확도를 확보하기 위해서는 로봇이 기울어지며 발생하는 오차 방지를 위해 LiDAR와 1/4 구를 로봇이 아닌 거터에 직접 설치할 필요가 있으며, 추후 실험을 통해 보

완 및 검증이 필요하다. 그러나 정밀거치로봇에 입력한 이동 명령에 따라 마커의 상대위치가 동일한 경향성을 보이며 추정되었으므로 이 연구에서 제안한 방법이 거터의 상대위치를 추정하기 위해 적용가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 교량 건설 현장에서 사고 위험이 높은 곳에 투입되는 작업자를 대체하기 위해 개발된 원격정밀 거치로봇에 필요한 상대위치 추정을 인력의 개입 없이 정밀하게 수행할 수 있는 방법을 제안하고 검증하였다. 제안된 방법은 LiDAR와 직경을 알고 있는 구형 마커로 구성되며, 마커의 중심위치를 추정하고, 중심간의 거리를 통해 상대위치를 추정하는 방법이다.

거터 제작장에서 수행된 실험은 제안된 방법의 야외 환경에서의 적용성을 검증하고, LiDAR의 부족한 정확도를 극복하기 위한 최적의 데이터 누적 횟수 선정에 대해 수행하였다. 실험 결과를 통해 본 연구에서 제안한 방법을 적용하여 거터와 기준점 사이의 상대위치 추정이 가능함을 확인하였다. 또한, 목표 오차 범위인 $\pm 3\text{mm}$ 를 만족하기 위한 최적의 데이터 누적 횟수를 25회로 선정하였다.

추가적으로, 원격정밀거치로봇의 시작점에 제안된 시스템을 적용하여 실제 거터 거치 상황을 모사하여 적용성 및 정확성 검증을 위한 실험을 수행하였다. 시작품의 제작 일정 상 거터의 한 쪽에만 시작품을 적용하였으며, 이로 인해 모사된 경계조건의 마찰력으로 인해 종방향 이동 결과는 비교할 수 없었으나 횡방향 이동 결과를 통해 이 연구에서 제안한 방법으로 거터와 교각 또는 교대의 상대위치를 추정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 정확도 향상을 위해 추가적인 확인이 필요하다.

추후 두 대의 원격정밀거치로봇 시작품에 본 시스템을 적용하여 거터의 원격거치 작업 중 양 단에서 발생하는 거터-마커(받침 중심위치) 간의 상대위치 모니터링을 위

한 본 시스템의 타당성 검토가 필요하다. 또한, 본 시스템의 현장에서의 실효성과 정밀도를 확보하기 위해, 원격정밀거리로봇의 기울어짐에 따라 발생하는 오차를 제거하기 위한 방안으로 LiDAR를 거더에 직접 설치하여 상대위치를 추정하는 방법의 정확도와 현장 적용성에 대한 검토가 필요하다.

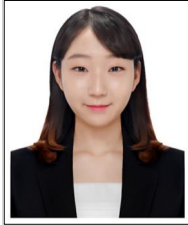
원격정밀거리로봇의 개발이 완료되고, 인력이 가장 많이 투입되는 상대위치 추정 과정의 무인화가 가능하면, 건설현장의 산업재해 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] H. M. La, R.S. Lim, B. Basily, N. Gucunski, J. Yi, A. Maher, F.A. Romero, H. Parvardeh, "Autonomous robotic system for high-efficiency non-destructive bridge deck inspection and evaluation", *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, IEEE, pp.1053-1058, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/CoASE.2013.6653886>
- [2] J. Guan, X. Yang, L. Ding, X. Cheng, V.C.S. Lee, C. Jin, "Automated pixel-level pavement distress detection based on stereo vision and deep learning", *Automation in Construction*, Vol.129, pp.103788, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103788>
- [3] R. Raisutis, R. Kazys, L. Mazeika, V. Samaitis, E. Zukauskas, "Propagation of ultrasonic guided waves in composite multi-wire ropes", *Materials*, Vol.9, No.6, pp.451, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9060451>
- [4] Z. Zheng, D. Ning, "Design and implementation of CCRobot-II: a palm-based cable climbing robot for cable-stayed bridge inspection", *2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2019-May, pp.9747-9753, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793562>
- [5] C. A. Mueller, T. Fromm, H. Buelow, A. Birk, M. Garsch, N. Gebbeken, "Robotic bridge inspection within strategic flood evacuation planning", *OCEANS 2017 - Aberdeen*, Vol.2017-October, pp.1-6, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084668>
- [6] J.E. DeVault, "Robotic system for underwater inspection of bridge piers", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol.3, No.3, pp.32-37, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1109/5289.863909>
- [7] M. Klöckner, M. Haage, H. Eriksson, H. Malm, K. Nilsson, A. Robertsson, R. Andersson, "Insights into automation of construction process using parallel-kinetic manipulators", *Construction Robotics*, Vol.7, pp.3-18, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s41693-023-00095-6>
- [8] L. Piškorec, D. Jenny, S. Parascho, H. Mayer, F. Gramazio, M. Kohler, "The brick Labyrinth", *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018: Foreword by Sigrid Brell-Çokcan and Johannes Braumann, Association for Robots in Architecture*, pp.489-500, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_37
- [9] S. Jokic, P. Novikov, S. Maggs, D. Sadan, S. Jin, C. Nan, "Robotic positioning device for three-dimensional printing", *arXiv e-prints*, arXiv:1406.3400, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.3400>
- [10] S. J. Keating, J.C. Leland, L. Cai, N. Oxman, "Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales", *Science Robotics*, Vol.2, No.5, eaam8986.
DOI: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8986>
- [11] N. Hack, T. Wangler, J. Mata-Falcón, K. Dörfler, N. Kumar, A.N. Walzer, K. Graser, L. Reiter, H. Richner, J. Buchli, W. Kaufmann, R.J. Flatt, F. Gramazio, M. Kohler, "Mesh mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork", *Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC)*, Vol.19, pp.1-10, 2017.
- [12] S. Goessens, C. Mueller, P. Latteur, "Feasibility study for drone-based masonry construction of real-scale structures", *Automation in Construction*, Vol.94, pp.458-480, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.015>
- [13] A. Więckowski, "JA-WA - A wall construction system using unilateral material application with a mobile robot", *Automation in Construction*, Vol.83, pp.19-28, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.005>
- [14] E. Asadi, B. Li, I.-M. Chen, "Pictobot: A cooperative painting robot for interior finishing of industrial developments", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.25, No.2, pp.82-94, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2816972>
- [15] Y.-S. Park, S.-Y. Lee, "Verification of horizontal position adjustment function of remote precision installation robot for bridge girder", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.24, No.1, pp.629-635, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.629>
- [16] Find minimum of unconstrained multivariable function using derivative-free method - MATLAB fminsearch. [cited 2018 July 13], Available From: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html> (accessed: Jul. 13, 2023)
- [17] Puck Hi-Res Lidar Sensor, Greater Image Resolution | Velodyne Lidar. [cited 2018 July 13]. Available From: <https://velodynelidar.com/products/puck-hi-res/> (accessed: Jul. 13, 2023)

김 경 민(Kyoung-Min Kim)

[정회원]



- 2018년 8월 : 서울대학교 공과대학
건설환경공학부 (공학석사)
- 2023년 2월 : 서울대학교 공과대학
건설환경공학부 (공학박사)
- 2023년 5월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 구조연구본부 박사후연
구원

<관심분야>

극한하중, 스마트건설

이 상 윤(Sang-Yoon Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 토목환
경공학과 (구조공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 사회환
경시스템공학과 (구조공학박사)
- 2003년 1월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 구조연구본부 연구위원

<관심분야>

프리랩 구조, 건설 로봇

박 영 수(Young-Soo Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 세종대학교 공과대학
건설환경공학과(공학석사)
- 2016년 2월 : 세종대학교 공과대학
건설환경공학과(공학박사)
- 2018년 11월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 구조연구본부 수석연구원

<관심분야>

교량 유지관리, 시공자동화