

국소영역에서 이동표적의 상대위치 측정 장치 개발

Development of Relative Position Measuring Device for Moving Target in Local Area

서명국^{1*}Myoung Kook Seo^{1*}

Received: 7 Sep. 2020, Revised: 5 Oct. 2020, Accepted: 12 Oct. 2020

Key Words : GPS Blind Spot(GPS사각지대), Relative Position(상대위치), Local Area(국소영역), Target Tracking (표식자추적)

Abstract: Intelligent devices using ICT technology have been introduced in the field of construction machinery to improve productivity and stability. Among the intelligent devices, Machine Guidance is a device that provides real-time posture, location, and work range to drivers by installing various sensors, controllers, and satellite navigation systems on construction machines. Conversely, the efficiency of equipment that requires location information, such as machine guidance, will be greatly reduced in buildings, and tunnels in the GPS blind spots. Thus, the other high-precision positioning technologies are required in the GPS blind spot zone. In this study, we will develop a relative position measurement system that provides precise location information such as construction machinery and robots in a local area where the GPS reception is difficult. A relative position measurement system tracks a marker in the form of a sphere installed on a vehicle by using the image base tracking technology, and measures the distance and direction information to the marker to calculate a position.

1. 서 론

최근 ICT 기술이 발전하면서 건설기계 분야에서도 생산성과 안정성을 향상하기 위한 ICT 기반의 지능형 기술이 도입되고 있다.^{1-3,10,11)} 지능형 기술 중 머신 가이드스(machine guidance)는 건설기계에 각종 센서와 제어기, 위성항법시스템 등을 장착하여, 운전자에게 자세와 위치, 작업범위 등을 실시간으로 제공하는 장치이다.³⁾ 머신 컨트롤(machine control)은 굴착기, 불도저, 모터 그레이더 등의 자동·반자동 장치로, 머신 가이드스 장비를 탑재하여 자동·반자동 제어를 위한 위치와 자세를 획득한다.

현재 머신 가이드스 장비는 위치와 헤딩방향을 인지하기 위해서 2개의 GPS 수신기를 사용하며, RTK-GPS(real time kinematic-GPS)는 개방된 공간에서 10~30mm 오차의 고정밀 위치 정보를 제공한다.

한편, 도심의 재개발지역이나 건축물 실내, 터널은 GPS 사각지대로, 신호 지연 및 굴절 등으로 큰 위치 오차가 발생한다. 이러한 GPS 난청 지역에서는 머신 가이드스와 같이 위치 수신에 필요한 장비의 효율성이 크게 떨어진다. 따라서 고정밀 위치 측정이 가능한 다른 측위기술이 필요하다.

본 연구에서는 GPS 수신에 어려운 국소영역에서 건설기계 및 로봇 등의 정밀한 위치 정보를 제공하는 상대위치 측정 시스템을 개발하였다. 상대위치 측정 모듈은 아래 Fig. 1과 2처럼 카메라(zoom camera), 레이저거리센서(azer distance measurement device), 팬틸트 모듈(pan tile module)로 구성되어 있으며, 차량에 설치된 구(sphere)형태의 표식자(target)를 추적하여 측정기기(P0)와 차량(P2) 사이의 상대위치(거리, 방향)를 측정한다.

* Corresponding author: seomk@koceti.re.kr

¹ Smart Engineering Lab., Korea Construction Equipment Technology Institute, Gunsan, Jeollabuk-do 54004, Korea
Copyright © 2020, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

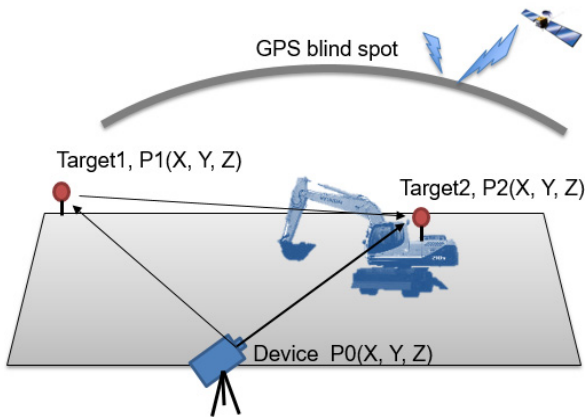


Fig. 1 Relative position measuring device available in GPS blind spot



Fig. 2 Configuration of relative position measuring device

한편, 기준점을 측정기기(P0) 대신에 사전에 위치가 측정된 임의의 지점(P1)으로 설정할 수 있다. 이 경우에는 차량(P2) 위치를 측정한 후 벡터 연산하여 임의의 지점(P1)과 차량(P2) 사이의 상대적인 위치를 계산한다.

2. 관련 연구

도심의 재개발지역이나 건축물 실내, 터널은 GPS 난청 지역으로 이러한 환경에서는 다양한 측위기술을 사용할 수 있다.⁴⁾

관성센서 기반 측위 기술은 자이로 센서, 가속도 센서, 지자기 센서 등과 같은 관성센서로부터 수집한 방향과 가속도를 주기적으로 누적하여 현재 위치를 측정한다. 관성센서 기반 측위 기술은 최근 다양한 필터링 기술을 적용하여 정확도가 향상되고 있지만, 근본적으로 누적 오차 문제를 가지고 있다.

수신신호 기반 측위 기술은 WiFi, UWB 등 다양한 신호 송수신기를 활용한 측위 기술이다. 정확도와 측위 가능 거리는 신호의 종류, 센서의 수와 간극에

따라 영향을 받으며, 일반적으로 15cm부터 수 m 사이의 오차를 갖는다.⁵⁾

영상 기반 측위 기술은 QR 코드, 패턴 같은 마커를 인식하여 카메라의 위치를 측정하는 방식으로, 일부 연구에서는 마커 대신 LED 조명을 활용하기도 한다.⁶⁾ 영상 기반 측위 기술은 저비용으로 구축할 수 있는 장점이 있지만, 보통 10m 이내의 근거리 영역에서 활용 가능한 기술이며, 오차 범위는 10cm 이상이다. 일부 연구⁷⁾에서는 카메라 영상을 기반으로 국소 변위를 정밀하게 측정하였지만 이동하는 대상에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 국소영역(30m 이내)에서 작업하는 건설기계 및 로봇의 위치를 측정하는 상대위치 측정 모듈을 개발한다. 주변 사물 및 마커 등을 인식하여 상대위치를 추정하는 기존 영상기반 위치 측정 방식과 달리, 본 연구에서는 이동하는 대상에 표식자를 설치하고, 영상기반 표식자 추적 기술, 고정밀 회전기기 및 거리측정기를 이용하여 정확한 상대위치를 측정한다. 본 연구에서는 실시간으로 위치를 측정하는 RTK-GPS의 오차가 10~30mm임을 고려하여, 상대위치 측정 모듈의 위치 측정 오차를 평균 30mm 이내로 한다.

3. 표식자 추적 및 위치 측정 모듈

상대위치 측정 모듈에서 카메라는 이동 차량에 장착된 표식자를 감지하고, 팬틸트 모듈은 영상에서 획득한 표식자의 위치를 기반으로 표식자가 영상에서 중앙에 위치하도록 상하좌우 회전한다. 표식자가 영상 중앙에 위치하면, 레이저거리측정 센서는 표식자와의 거리를 측정한다. 팬틸트 모듈로부터 표식자와의 방향정보(θ, ϕ)와 레이저거리측정 센서로부터 거리(r)를 취합하여 표식자의 위치 정보(x, y, z)를 계산한다.

본 연구에서는 30mm 이내로 위치 정확도를 높이기 위해서 방향에 의한 오차를 20mm이내, 거리에 의한 오차를 10mm 이내로 설정하고, 이를 바탕으로 사용할 가능한 센서를 조사하여 최종 사용할 센서를 선정하였다.

먼저, 카메라는 고해상도의 영상을 제공할수록 정확한 표식자 위치 검출이 가능하다. 아래 Table 1처럼 가로폭 3m와 5m 영역에 지름 300mm의 구형 표식자가 잡히도록 촬영할 경우, 영상의 가로 해상도가 각 1200 픽셀, 1600픽셀, 1900픽셀 일 때 영상의 화소(pixel)당 위치 분해능은 1.58mm에서 4.17mm까지

Table 1 Positional precision according to image resolution

Area Width (mm)	Image width resolution (pixels)	Precision per pixel (mm)
3000	1200	2.50
	1600	1.88
	1900	1.58
5000	1200	4.17
	1600	3.13
	1900	2.63

나타난다. 즉, 고해상도 영상으로 대상의 이동 범위와 속도를 고려하여 최대한 대상의 크기를 확대하면 수 mm 이내로 정밀한 표식자 위치 검출이 가능하다.

그리고 다양한 거리에서도 영상 내 표식자 크기를 일정하게 유지하기 위해서는 초점거리 조정이 필요하다. 본 연구에서는 줌 조절과 고해상도 영상필요성을 고려하여 30배 줌과 2048x1536 해상도에서 영상을 최고 초당 22 프레임을 제공하는 Imaging source 社の DFK Z30GP031를 선정하였다.

영상에서 감지한 표식자의 방향정보(θ, ϕ)를 인지하고 표식자를 영상 중심으로 정확하게 위치시키기 위해서 고정밀 팬틸트 모듈이 필요하다. 예를 들어 영상 중심에서 0.1도 회전할 경우, 10m에서는 17.45mm, 20m에서는 34.9mm 이동한다. 본 연구에서는 팬/틸트 각도 최소 0.003도 분해능을 제공하는 Flir 社の PTU-E46-70를 선정하였다. 고분해능의 팬틸트 모듈은 30m 떨어진 타겟을 영상 중심으로부터 3픽셀 이내(약 10mm)에 잡히도록 위치시킬 수 있었다.

거리측정센서는 실내외 환경에서 임의의 사물과 거리 측정이 가능하고, 10mm 오차 이내의 거리 측정 정확도, PC와의 실시간 통신 가능 여부를 고려하여 Dimetix 社の DPE-10-500를 선정하였다.

표식자는 기존 마커 또는 특정 사물을 지정하여 사용할 수 있지만, 본 연구에서는 다양한 시점에서 동일한 형상의 표식자 검출, 로봇 및 차량 등의 탐재 가능성 여부를 고려하여 구 형태의 표식자를 선정하였다. 표식자는 최소 30m 상에서 표식자 검출이 가능하고 레이저 거리 센서의 반사 등을 고려하여 최소 직경이 200mm 이상이 필요하다.

Fig. 2와 같이 카메라와 레이저거리측정 센서는 팬틸트 모듈 상단에 장착된다. 방향에 따른 위치 측정 오차를 최소화하기 위해서 카메라와 레이저 거리측정 센서의 투사 중심이 팬틸트 모듈 팬 회전 중심축

에 일치하도록 설치하였다. 그리고 카메라 영상 중심에 표식자를 위치시킨 후에 레이저거리 측정 센서의 레이저 포인터가 카메라 영상 중심선에 위치하도록 방향을 보정하였다. 또한, 보관 및 작동 중 충격으로 인하여 센서간 위치 및 방향이 틀어지는 것을 방지하기 위해서 일체형 장착 지그를 제작하여 3개 모듈을 고정시켰다.

4. 영상에서 표식자 감지

대상을 추적하는 다양한 방법이 있지만 본 연구에서는 영상을 기반으로 하는 대표적인 두 가지 방식을 사용하였다.

4.1 색상과 형상 기반 표식자 감지

표식자의 색상과 형상 정보를 이용하여 영상에서 표식자를 감지할 수 있다. 이를 위해 RGB색상 채널의 영상에서 표식자의 색상으로 영상을 이진화하고, 침식과 확산 필터를 적용하여 산발적으로 생성되는 노이즈는 최소화하였다. 이진영상에서 OpenCV의 원검출(또는 사각형 검출) 알고리즘을 사용하여 표식자를 검출하였다.

Fig. 3에서 보여주듯이 색상과 형상 기반 표식자 감지 방법은 표식자 색상과 대비되는 공간 및 실내에서는 감지 정확도가 높았다. 하지만, 실외 환경에서는 표식자 검출 정확도를 떨어뜨리는 다양한 요소가 존재하였다(Fig. 4). 첫째로, 표식자와 유사한 색을 포함한 객체가 주변에 다수 분포할 시 감지 정확도가 낮아진다. 전처리과정에서 부분적으로 유사 색상의 객체 및 배경을 최소화하였지만 주변 환경에 따라서 감지 정확도가 불안정하게 나타났다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 처리하기 위해 표식자의 위치 이력과 크기 정보를 이용하여 표식자 후보를 필터링하였다.

둘째, 실외 환경에서 표식자가 햇빛에 노출될 경우 표식자 상부에 강한 빛 반사가 일어나고, 그늘진 곳에서는 하부에서 그림자가 생성되었다. 빛 반사영역



Fig. 3 Target detection using color and shape

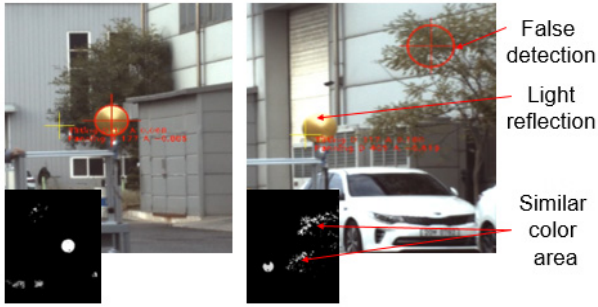


Fig. 4 Target detection conducted outdoors

과 그림자 영역은 영상에서 표식자의 색상정보가 손실되어 타겟 중심 위치가 이동하거나, 타겟 감지율을 떨어뜨렸다. 본 연구에서는 카메라 전방에 편광필름을 장착하여 빛 반사 영역을 최소화하였고, 편광필름 사용으로 줄어드는 영상 밝기를 보정하기 위해서 감마보정 알고리즘⁸⁾을 적용하였다(식 1). 감마 보정은 카메라 영상 HSV 컬러 채널 중에서 명도 채널(V)에 적용하였다.

$$y = M \left(\frac{x}{M} \right)^g, M = 255 \quad (1)$$

표식자의 색상과 형상 정보를 이용한 표식자 감지 및 추적 방법에 다양한 대응 기법을 적용하여 표식자 감지 정확도를 향상할 수 있었지만 다수 외부 변수가 존재하는 실외환경에서는 불안정한 성능을 보였다. 결과적으로, 색상과 형상 기반 표식자 감지 기법은 조명환경이 안정적이고 최대한 표식자와 유사한 색상의 객체가 없는 실내 환경에 적합하였다.

4.2 패턴이미지 기반 표식자 추적

다양한 조명 및 주변 환경에서도 표식자의 감지 정확도가 높고 임의의 대상(바퀴, 무늬, 물체 등)을 타겟으로 지정할 수 있도록 특정 타겟 영역을 맵핑하여 타겟을 추적하는 기술을 적용하였다.

타겟 추적 정확도는 추적 알고리즘에 따라 성능이 좌우되기 때문에 Meanshift 알고리즘과 OpenCV 제공하는 추적 알고리즘(MIL, KCF, MedianFlow, TLD, MOSSE, CSRT)의 성능을 분석하였다.



Fig. 5 Tracking result using CSRT algorithm

성능 시험 대상은 온라인상에서 제공하는 시험용 영상과 Fig. 5처럼 임의의 방향으로 움직이는 구형 사물로 하였다. 추적 대상인 탁구공은 실을 통해 나뭇가지에 매달려 있으며, 바람에 따라 임의의 방향으로 움직이고, 햇빛과 나무 그림자 영향으로 색상이 조금씩 바뀐다.

각 추적 알고리즘의 성능은 타겟의 유지, 가려짐에 대한 극복, 추적 속도 등으로 판단하였다. 대부분 추적 알고리즘은 초기 설정한 대상이 천천히 움직이는 경우에는 안정적으로 추적이 가능하였다. 그러나 속도가 증가하거나 일시적으로 가려질 경우, 추적 대상을 잃어버리거나 대상이 바뀌어 버리는 문제가 발생하였다.

상대적으로 CSRT(Channel and Spatial Reliability Tracker)은 다른 알고리즘에 비해 추적 속도가 느리지만 감지 정확도가 높게 나타났다. 그러나, 각 프레임에서 추적 대상을 갱신하는 추적 알고리즘 특성상 CSRT알고리즘도 시간이 지남에 따라 표적 중심이 일부 이동하였고, 일시적으로 다른 사물에 의해 추적 대상이 가려지면 추적 실패하는 경우가 발생하였다. 이러한 문제는 추적 실패 조건을 설정하고, 추적 실패 시에서 사용자가 대상을 다시 조정하고 추적을 진행하도록 하였다. 추적 실패는 초기 지정된 패턴과 평균 색상이 20%이상 차이가 발생할 경우로 설정하였다.



Fig. 6 Target detection test conducted indoors

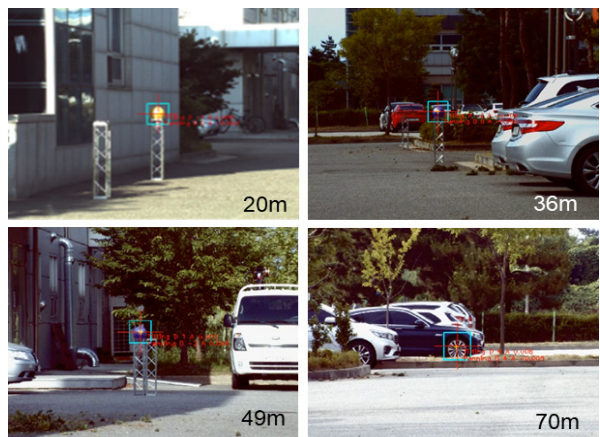


Fig. 7 Result of target detection



Fig. 8 Positioning test conducted indoors



Fig. 9 Result of target detection

Fig. 6과 7은 거리와 대상이 다른 표식자를 패턴이 이미지 기반으로 추적한 결과이다. 표식자와 유사한 색상이 있는 환경과 햇빛, 그림자의 영향에도 패턴이 이미지 기반의 표식자 추적은 안정적인 성능을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 상대위치 측정모듈에서는 패턴이 이미지 기반 추적기술을 적용하였다.

4.3 팬틸트 모듈 구동

영상에서의 표식자가 감지되면 사전에 설정한 표식자의 임의 거리값과 영상 중심으로부터 표식자까지의 거리 정보를 이용하여 팬/틸트 각도(수평/수직 이동 각도)를 추출한다. 팬틸트 모듈은 추출한 각도를 기반으로 회전하여 영상 중심에 표식자가 위치하도록 한다.

팬틸트 모듈의 하드웨어적인 특성상 영상에서 추출한 팬/틸트 각도를 실시간으로 반영하기 어렵다. 안정적인 표식자 추적을 위해서는 영상에서 회전 방향 추출과 팬틸트 모듈의 동기화가 필요하다. 본 연구에서는 영상에서 추출한 팬/틸트 각도 중 큰 각도를 우선 적용하여 팬틸트 모듈을 구동하였으며, 팬틸트 모듈 동작 중에 새로운 입력을 방지하고, 충분한 구동 시간을 보장하기 위하여 각도에 따라 0.5초 이내의 대기시간을 설정하였다.

그리고, 팬틸트 회전 속도는 2단계 구간으로 나누어서 구동하도록 하였다. 기준 각도(1도)에 이내에서는 저속으로 회전하도록 하였고, 영상에서 추출한 회

전 각도가 0.05도 이하이면 해당 방향에 대해서는 수렴한 것으로 간주하여 정지하도록 하였다.

5. 실내 환경에서의 시험

Fig. 8, 9와 같이 측정모듈과 이동하는 타겟(표식자)과의 거리가 15m~20m인 실내에서 표식자의 위치를 변경하면서 위치를 측정하였다. 동시에 상대위치 측정 모듈의 정확도 검증을 위해서 위치 측정 오차가 1mm 이하인 고정밀 광파기(total station)를 통해 각 지점에서 기준위치를 측정하였다. 광파기에서는 대상 표식자를 자동으로 시준할 수 없기 때문에 표시된 눈금과 회전 다이얼을 이용하여 수동으로 표식자의 중심 위치로 시준하여 위치를 측정하였다.

상대위치측정 모듈에서 측정된 10곳에서 위치 데이터는 직교좌표계 변환한 후, ICP(iterative closest point) 알고리즘⁹⁾을 이용하여 광파기의 기준 데이터 좌표계로 변환시켰다. ICP 알고리즘은 입력 데이터(p_i)를 모델 데이터(q_i)로 정렬하고자 할 때, 오차(e)를 최소화하는 회전행렬(R)과 이동벡터(t)를 계산한다(식 2).

$$e = \sum_i ((Rp_i + t - q_i) \cdot n_i)^2 \quad (2)$$

여기서, n 은 모델 데이터의 법선 벡터이다.

Table 2와 Fig. 10처럼 기준데이터 좌표계로 변환한 상대위치측정 모듈의 위치값은 기준위치와 평균 13.6mm 오차가 있음을 확인할 수 있다. 시험 장소는 조명 상태가 일정하고, 표식자를 가리는 장애물이 없어 상대위치 측정 모듈이 안정적으로 구동 가능하였다.

Table 2 Accuracy of measured position

Measured position (x, y, z) mm	Reference position (x, y, z) mm
4191.18, 20159.91, 2113.99	4187.50, 20150.40, 2121.20
2460.55, 18271.35, 2110.26	2469.00, 18265.40, 2105.40
-306.15, 17834.96, 2071.44	-288.80, 17829.19, 2074.50
-1748.77, 17497.78, 2070.70	-1750.70, 17500.90, 2066.70
-2960.59, 16846.14, 2065.94	-2944.90, 16838.30, 2076.20
-2417.97, 15147.14, 2085.06	-2425.60, 15143.90, 2082.80
-199.13, 15263.18, 2080.07	-198.60, 15263.20, 2080.10
2279.30, 15246.59, 2098.52	2270.90, 15257.90, 2090.40
4336.88, 15759.49, 2099.67	4315.40, 15771.60, 2112.30
2619.00, 18293.88, 2118.00	2620.10, 18299.69, 2104.10

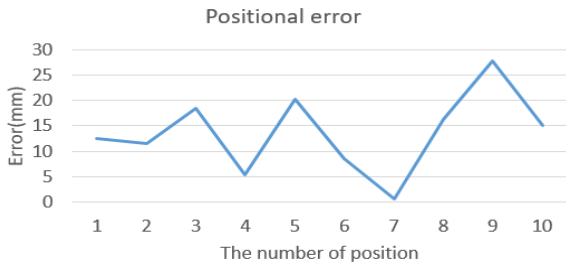


Fig. 10 Error of measured position

6. 실외환경에서의 시험

실내에서 수행한 시험과 동일한 방식으로 실외 환경에서도 상대위치 측정모듈의 위치 측정 정확도를 검증하였다(Fig. 11, 12). 측정모듈과 타겟과의 거리가 18m~30m이며, 타겟을 10곳 이상 이동시켜 가면서 타겟의 상대위치를 측정하였다. 또한 측정한 위치 데이터는 구면 좌표계에서 직교좌표계 변환한 후, ICP알고리즘을 이용하여 기준데이터 좌표계로 변환시켰다.

Table 3과 Fig.13처럼 실외 환경에서 측정한 위치 데이터는 기준데이터와의 비교에서 평균 오차가 27.8 mm 으로 나타났다. 오차가 증가한 것은 실내 실험과 비교해 표식자의 거리가 평균 10m 떨어진 것으로부터 발생한 것으로 분석된다.

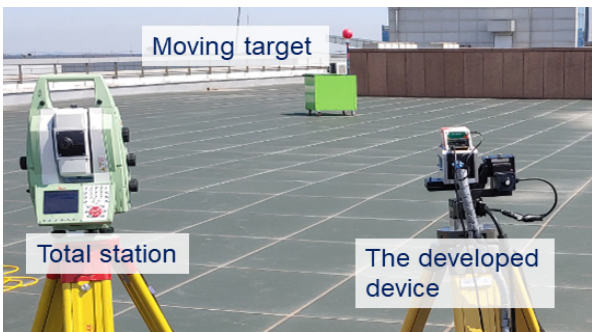


Fig. 11 Positioning test conducted outdoors



Fig. 12 Result of target detection

Table 3 Accuracy of measured position

Measured position (x, y, z) mm	Reference position (x, y, z) mm
4791.38, 18560.46, 597.69	4758.13, 18569.37, 594.38
2199.25, 17974.91, 621.42	2222.18, 17991.78, 612.47
2097.57, 28367.97, 746.56	2113.32, 28340.45, 748.90
-3615.78, 27054.28, 701.46	-3598.40, 27040.75, 693.84
-1284.29, 18642.11, 641.85	-1257.37, 18650.08, 649.49
870.89, 21082.07, 669.22	852.77, 21085.33, 666.86
2985.52, 22738.45, 687.46	2954.48, 22748.25, 690.44
7935.90, 22804.06, 652.69	7935.48, 22795.30, 669.15
11065.51, 20357.54, 648.54	11038.02, 20371.89, 630.61
7312.77, 17250.73, 538.35	7330.11, 17239.40, 549.11

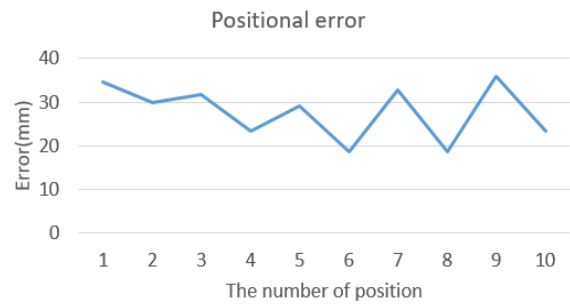


Fig. 13 Error of measured position

7. 결론

본 논문에서는 GPS 사각지대에서 작업하는 건설 기계 및 로봇을 추적하고, 정밀한 상대위치를 측정하는 영상기반 상대위치 측정 모듈을 개발하였다. 이동하는 차량에 설치된 구형 타겟을 추적하기 위해 색상과 패턴 이미지를 이용한 방식의 성능을 분석하였고, 실내외 환경에서 패턴 이미지를 이용한 대상 추적 방식의 유용성과 정밀도를 확인하였다. 한편, 상대위치 측정 모듈은 카메라 영상을 통해 타겟 인식과 추적이 이루어지기 때문에 조명 상태가 일정하고 타겟이 항상 노출될 수 있는 환경에서 안정적으로 위치를 측정할 수 있다.

향후 연구에서는 상대위치 측정 모듈의 상용화를 위해 표식자 추적의 가속화가 필요하다. 현재는 안정적인 추적을 위해 회전기기의 구동시간까지 고려했기 때문에 최종 위치 값을 얻기까지 5초 이상 소요되었다. 향후 연구에서는 영상에서 회전 정보 추출과 회전기기의 구동 간 빠른 동기화를 통해 대상과 측정기기간 이격을 최소화하여 실시간으로 위치를 측정하고자 한다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호: 20SMIP-A157130-01)으로 수행되었습니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) H. G. Park and K. K. Ahn, "Analysis on the Trend of Intelligent Construction Equipment", *Journal of Drive and Control*, Vol.12, No.1, pp.29-33, 2015.
- 2) S. H. Lee et al., "Recent Developments and Prospect of Automation and Robotics Technology in Construction", *Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society*, Vol.8 No.2, pp.57-63, 2011.
- 3) D. Kim, "Smart Construction and Its Component Technology," *Journal of Drive and Control*, Vol.14, No.3, pp.59-64, 2017.
- 4) H. W. Ahn and N. M. Moon, "Artificial Intelligence-based Indoor Positioning Technology Trends and Prospects," *Broadcasting and Media Magazine*, Vol.25, No.1, pp.75-82, 2020.
- 5) R. Faragher and R. Harle, "Location Fingerprinting with Bluetooth Low Energy Beacons", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.33, No.11, pp.2418-2428, 2015.
- 6) S. H. Jung et al., "Position Information Acquisition Method Based on LED Lights and Smart Device Camera Using 3-Axis Moving Distance Measurement", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.40, No.01, pp.226-232, 2015.
- 7) D. Feng et al., "A Vision-Based Sensor for Noncontact Structural Displacement Measurement", *Sensors*, Vol.15, No.7, pp. 16557-16575, 2015.
- 8) S. K. Bhatia et al., "Advances in Computer Communication and Computational Sciences", *Proceedings of IC4S*, Vol.1, pp.301~302, 2017.
- 9) P. J. Besl and N. D. Mckay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, pp.239-256, 1992.
- 10) J. B. Jeong and K. S. Kim, "A Study on Driving Algorithm and Communication Characteristics for Remote Control of Mini Excavator", *Journal of Drive and Control*, Vol.15, No.4, pp.81-90, 2018.
- 11) Y. C. Kwon et al., "Development of the HPM System to Improve Efficiency of the Hydraulic Excavator", *Journal of Drive and Control*, Vol.16, No.4, pp.1-8, 2019.