Journal of Korea Multimedia Society Vol. 22, No. 9, September 2019(pp. 1011-1019)
https://doi.org/10.9717/kmms.2019.22.9.1011

UWB 및 MEMS IMU 복합 센서 기반의 위치 추적 시스템

권 성 근†

Position Tracking System Based on UWB and MEMS IMU

Seong-Geun Kwon†

ABSTRACT

In this paper, we propose a system that can more precisely identify and monitor the position of the tool used in the assembling workplace such as automobile production. The proposed positioning monitoring system is a combination of UWB communication module and MEMS IMU sensor. Since UWB does not need modulation and demodulation function and has low power density, UWB is widely used in indoor positioning field. However, it may cause positioning error due to errors in RF transmission and reception process, which may cause positioning accuracy. Therefore, in this paper, we propose an algorithm that uses IMU as an auxiliary means to compensate for errors that may occur in positioning using only UWB. The tag and anchor of UWB module measure the transmission / reception time by transmitting signals to each other and then estimate the distance between tag and anchor. The MEMS IMU sensor serves to provide positioning calibration information. The tag, which is a mobile node and attached to a moving tool, measures the three-dimensional position of the tool and transfers the coordinate data to the anchor. Thus, it is possible to confirm whether or not the specific tool is properly used according to the prescribed regulations.

Key words: Realtime Positioning, UWB, MEMS IMU, Monitoring, Kalman Filter

1. 서 론

자동차 산업은 전 세계적으로 매출액이 1조 달러가 넘고 1천만 명 이상을 고용하고 있는 세계 최대 규모의 제조업으로서 대략 2만여 개 이상의 부품으로 구성된 복합적 성격의 대표적인 조립 산업이다. 이러한 자동차 조립 공정은 도장된 차체에 약 3천여 종의 내장, 계기판, 시트, 유리, 엔진, 변속기, 및 차축 등의 유닛을 조립하는 노동집약적 공정으로서 타 공정에 비해 자동화 비율이 가장 낮은 특징을 갖고 있다.

현재의 자동차 조립 공정은 작업 과정에 대한 모니터링이 실시간으로 이루어지지 않고 있는 상황이여서 각 공정에서 작업이 누락되었는지 등을 파악할 수 없다. 따라서 작업 중인 공구가 정상적인 위치에서 작업하고 있는지를 파악할 수 있다면 지시된 작업이 누락되었는지 혹은 이중 작업을 하고 있는지 등에 대한 확인이 가능하여, 제조 공정에서 발생할 수 있는 불량을 사전에 차단할 수 있으므로 제조 공정의 생산성 및 품질 향상을 이룰 수 있을 것이다[1][2].

본 논문에서는 작업 중인 공구의 위치를 실시간 모니터링하기 위해 UWB (ultra wide band)와 MEMS (micro electro mechanical system) IMU (inertial measurement unit) 센서를 활용하여 공구의 위치 추적 시스템을 제안한다. 최근 UWB 기술을 활용한 실

※ Corresponding Author : Seong-Geun Kwon, Address: (38428) 50, Gamasil-gil, Buho-ri, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea, TEL : +82-10-3006-5659, FAX : +82-, E-mail : sgkwon@kiu.ac.kr

Receipt date : July 8, 2019, Revision date : Aug. 6, 2019
Approval date : Sep. 5, 2019

† Department of Electronics Engineering, KyungIl University

시간 위치 인식 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, WiFi 기술이 대략 20㎒의 대역폭을 사용하는데 비해 초광대역을 의미하는 UWB는 수 ㎓이상의 넓은 대역폭을 이용하여 WiFi보다 10배 낮은 전력 소모인 반면 전송 거리는 10m 정도에 그치는 특성이 있다[3][4]. 또한 IMU는 이동 물체의 속도와 방향, 중력, 가속도를 측정하는 장치로서 가속도계, 각속도계, 지자기계, 및 고도계를 이용한다[5].

본 논문에서는 공구의 위치 측정을 위해서 UWB 통신 모듈을 활용하였고, UWB의 측정 오차를 줄이기 위한 측위 보정 데이터를 제공하기 위해 MEMS IMU 센서를 활용하였다. 전기 및 기계적인 원인으로 인해 UWB 혹은 IMU 센서의 출력 데이터에는 측위 데이터 이외에 노이즈 성분들이 포함되어 있다. 따라서 본 논문에서는 측위 데이터에 존재하는 노이즈 성분을 제거하여 정확한 위치 값을 도출하기 위해 칼만 (Kalman) 필터를 사용하였다[6]. 본 논문에서 제안한 공구의 위치 측정 시스템을 통해 정해진 작업 경로를 벗어난 공구를 실시간으로 파악할 수 있어 작업의 누락 등을 확인할 수 있을 것으로 파악되는데, 실제 다양한 실험을 통해 측위 정밀도는 20㎝이하인 것으로 확인되었기 때문에 작업 포인트가 20㎝ 이상인 공정에서는 공구의 위치 파악이 가능하다.

본 논문은 2장에서 제안한 복합 센서 기반의 위치 추적 시스템을 소개하고, 3장에서는 기본 단위 테스트 결과를 통해 제안한 위치 측정 시스템의 타당성을 조사하였고, 4장에서는 제안한 위치 추적 시스템의 성능을 평가하기 위해 진행된 실험 결과를 나타내었다.

2. 제안한 복합 센서 기반의 위치 추적 시스템

UWB 무선 기술은 반송파를 사용하지 않고 기저대역에서 수 ㎓ 이상의 매우 넓은 주파수 대역을 사용하여 통신에 응용되고 있는 기술로서 수 나노초의 매우 좁은 펄스를 사용함으로써 기존 무선 시스템의 잡음과 같은 매우 낮은 스펙트럼 전력으로 기존의 이동통신 시스템과 상호 간섭 없이 사용 가능한 시스템이다. 본 논문에서 제안한 복합 센서 기반의 위치 추적 시스템은 움직이는 물체에 부착되어 물체의 위치를 측정하는 측위 태그 (tag)와 미리 정해진 고정 위치에 설치되어 태그와 UWB 통신을 수행하는 앵커 (anchor)로 구성된다.

2.1 UWB 및 MEMS IMU 센서 기반의 위치 측위 센서 태그 및 앵커

본 논문에서는 UWB 통신 모듈과 MEMS IMU 센서를 조합한 위치 측정 시스템을 제안하고 있는데, 측위 태그의 구조는 Fig. 1에서와 같이 UWB 모듈, MEMS IMU 센서, MCU, 및 배터리 모듈로 구성되어 있다. 반면 고정 위치에 설치되는 앵커는 위치 데이터를 측정할 필요가 없으므로 MEMS IMU 센서가 제거되고 WiFi 혹은 이더넷 모듈이 포함되는 형식으로 구성된다[7].

즉 태그와 앵커의 UWB 모듈은 서로 간에 신호를 전송하여 송수신 시간을 측정한 후 이를 통해 태그와 앵커간의 거리를 예측하는 역할을 하고, MEMS IMU 센서는 가속도계, 각속도계, 지자기계 및 고도계를 통해 측위 보정 정보를 제공하는 역할을 한다. 이동

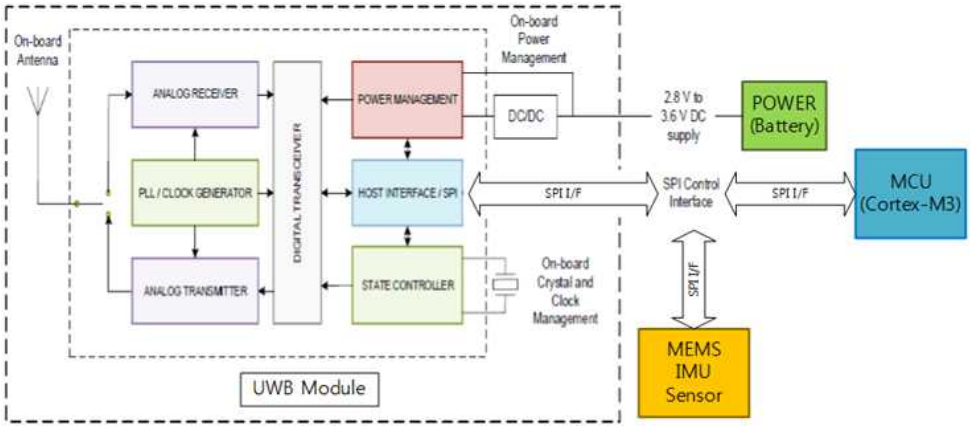

Fig. 1. Block diagram of tag composing of UWB and MEMS IMU.

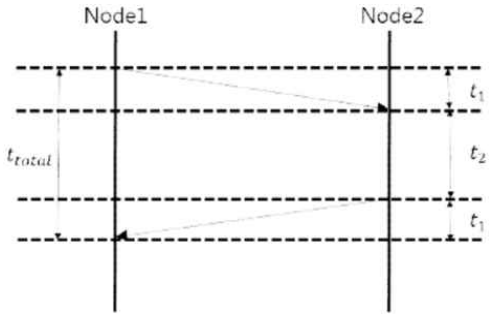

Fig. 2. Positioning principle in TWR system.

노드인 태그는 이동하는 공구에 부착되어 공구의 3차원 위치를 측정하여 좌표 데이터를 앵커에 전달하는 기능을 수행하고, 또한 알람을 위한 LED 램프를 통하여 올바른 작업을 수행하고 있는지를 작업자에게 알려주는 역할을 한다. 앵커는 태그들 사이의 거리를 확인하기 위한 장치로 고정 위치에 설치되어 다수의 태그에서 수집된 위치 데이터 및 알람 정보를 수집한다.

2.2 위치 측정 알고리즘 구현

TWR (two way ranging) 방식은 노드1이 펄스를 전송한 후 이 신호를 수신한 노드2가 다시 펄스를 노드1에 송신하여 두 노드 사이에서 송수신된 펄스의 왕복 시간을 측정한 후, 노드2에서의 처리 시간을 제외하면 노드 간의 거리를 측정할 수 있다는 근거에서 개발되었는데, 이는 Fig. 2에서와 같이 표현될 수 있다[8].

일반적으로 빛의 이동 거리는 빛의 속도와 측정 시간의 곱으로 표현되므로, 두 노드간의 거리 D는

$$D = 3.08 \times 10^8 \cdot t_1 \tag{1}$$

와 같이 표현되고, 이때 t_1은

$$t_1 = \frac{t_{total} - t_2}{2} \tag{2}$$

와 같음을 Fig. 2에서 알 수 있다. 여기서 t_1은 노드간에 신호가 전달되는 시간을 의미하고, t_2는 펄스 신호를 수신한 노드2가 다시 신호를 전송하기까지 소요되는 시간을 의미하며, t_{total}은 노드1이 펄스를 송신한 시점부터 다시 수신한 시점까지의 시간을 나타낸다. 이와 같은 TWR은 각 노드들 간에 동기를 맞추지 않더라도 정확한 측위가 가능하여 시스템을 간소화할 수 있는 장점이 있다.

2.3 칼만 필터 기반 위치 측정 알고리즘

칼만 필터는 노이즈가 포함되어 있는 선형 동적 시스템의 상태를 추정하는 재귀 필터로서 측정 노이즈가 포함된 측정 데이터를 재귀적으로 처리하여 현재 상태에 대한 최적의 통계적 예측을 수행할 수 있어 컴퓨터 비전, 로봇 공학, 레이더 등의 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 이와 같은 칼만 필터는 Fig. 3에서와 같은 5단계로 구성되는데, 크게는 현재 상태를 예측하는 단계와 측정값을 포함하여 더 정확한 값을 추정하는 단계로 구분된다[6].

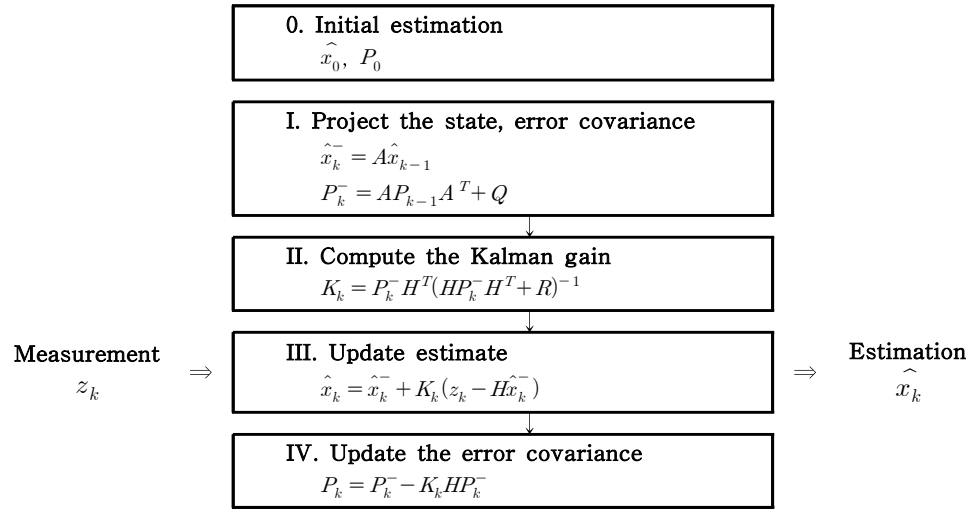

Fig. 3. Positioning process with Kalman filter.

센서 모듈에서 k시간에 측정된 위치 데이터 z_k는 노이즈 성분들이 포함되어 있기 때문에 신호 해석에 무리가 있다. 따라서 칼만 필터에서는 노이즈 성분이 제거된 추정값 $\hat{x_k}$을 예측하기 위해 칼만 이득 K_k를 계산한 후 이를 활용하여 추정값 $\hat{x_k}$를 예측한다. 추정값 $\hat{x_k}$과 칼만 이득 K_k는

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) = (1-K_kH)\hat{x}_k^- + K_kz_k \quad (3)$$

$$K_k = P_k^- H^T(HP_k^- H^T + R)^{-1} = \frac{P_k^- H^T}{(HP_k^- H^T + R)} \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 이때 $\hat{x}_k^-$ 및 P_k^-는 각각 상태변수 예측값 및 오차 공분산 예측값을 나타내는데,

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} \quad (5)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

와 같이 정의된다. 이때 A 및 H는 각각 상태전이 및 상태변수 행렬이고, Q 및 R은 각각 시스템 및 측정 노이즈의 공분산 행렬이다.

식 (3)을 살펴보면 칼만 이득에 기반한 적절한 가중치를 예측값 $\hat{x_k}$과 측정값 z_k에 곱한 후 서로 더하는 방식으로 최종 추정값 $\hat{x_k}$을 예측하는 것을 알 수 있고, 식 (4)에서 칼만 이득 K_k는 측정 노이즈 성분 R에 반비례하는 것을 확인할 수 있다. 즉 측정 노이즈 성분이 커지게 되면 칼만 이득 K_k는 줄어들게 되어 측정값 z_k가 최종 추정값 $\hat{x_k}$에 반영되는 비율이 감소하게 된다. 식 (6)로부터 오차 공분산 예측값 P_k^-는 시스템 노이즈 성분 Q에 비례하는 것을 알 수 있고, 식 (4)로부터 칼만 이득 K_k는 공분산 예측값 P_k^-에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 칼만 이득 K_k는 시스템 노이즈 성분 Q에 비례하게 된다. 즉 시스템 노이즈 성분 Q가 증가한다는 것은 예측값 $\hat{x_k}$의 신뢰도가 낮아지는 것을 의미하기 때문에 추정값 $\hat{x_k}$의 예측에 측정값의 성분들이 상대적으로 많이 반영되게 된다[6].

3. 제안한 위치 추적 시스템의 단위 검증

본 장에서는 제안한 측위 시스템의 기본적인 성능을 평가하기 위하여 실내외에서의 기본 통신 시험, LOS (ling of sight) 시험, NLOS (non LOS) 시험, 무반향실에서의 정지 시험을 진행하였다.

3.1 기본 통신 시험

기본 통신시험은 Fig. 4에서와 같이 실내, 복도, 및 야외 등의 다양한 장소에서 진행되었는데, 각 장소의 고정 위치에 설치된 다수의 앵커가 정지해 있거나 이동하는 태그의 위치 좌표값을 원활히 모니터링하는지를 파악하였는데, 실험 결과로부터 위치 좌표값을 갖는 패킷이 정상적으로 수신되는 것을 확인하였다.

3.2 LOS 시험

앵커와 노드간의 통신 기능을 검증한 이후에는 LOS 시험을 진행하였는데, Fig. 5에서와 같이 실내의 장애물이 없는 공간에 3개의 앵커를 설치한 후, 그 공간 내에서 z축의 위치가 고정된 16개의 지점에 존재하는 태그의 좌표값을 반복 측정하였다.

LOS 반복 실험의 결과는 Table 1에서와 같은데, 대부분의 실내 오차는 ±20㎝ 이내인 것으로 확인되었다.

3.3 NLOS 시험

LOS 검증 이후 장애물이 있는 실내 공간에서의 위치 측정 성능을 파악하기 위해 Fig. 6에서와 같이 NLOS 시험을 진행하였는데, 본 실험에서는 실내의

Fig. 4. Communication test in indoor and outdoor.

Fig. 5. LOS environment test.

Table 1. Indoor LOS measurement data

Measurement	Measurement error [mm]	
	x axis	y axis
Average [mm]	68.01	-29.56
Minimum value [mm]	-194	-194
Maximum value [mm]	195	188

Table 2. NLOS measurement data

Measurement	Measurement error [mm]	
	x axis	y axis
Average [mm]	-43.25	-45
Minimum value [mm]	289	107
Maximum value [mm]	-382	-237

4개 위치에 존재하는 태그의 위치 좌표값을 반복 측정하였다.

NLOS 반복 실험의 결과는 Table 2에서와 같은데, 예상했던 것과 같이 NLOS 환경에서는 LOS 환경에 비해 측정 오차가 다소 높게 나타남을 확인하였다.

3.4 무반향실 시험

마지막 기본 성능 검증 시험으로 무반향실에서의 측정 시험을 진행하였다. Fig. 7에서와 같이 가로, 세로, 및 높이 방향으로 5 m 간격으로 4개의 앵커를 설치하고 내부 공간의 4개 위치에서 태그의 위치를 반복 측정한다.

무반향실에서의 정지 결과는 Table 3서와 같은데, 이 때 태그는 삼각대에 고정 설치되었다. x 및 y 축 방향으로는 비교적 양호한 정밀도를 유지하였지만 상대적으로 z축 방향에서는 큰 측정오차가 발생하였음을 확인하였지만, 모두 ±20 cm 범위 내에 존재하는 것을 확인하였다.

4. 위치 추적 시스템의 실험 결과 및 고찰

고정 위치에 대한 측정 시험 이후 본 장에서는 이동 물체에 대한 실험 결과를 설명하고자 한다. 본 실험에서는 실내 무반향실과 실제 공구의 작업 환경에서 진행되었다.

4.1 무반향실에서의 위치 추적 시험

무반향실에서의 공구 위치 추적 실험은 Fig. 8에서와 같이 가로, 세로, 및 높이 방향으로 5 m 간격으로 4개의 앵커를 설치하고 정육면체 내부 공간에서 태그의 움직임을 제어하여 위치를 반복 측정하였는데, 이때 태그는 3축 직교로봇에 장착되어 위치 제어된다.

Table 3. Measurement data for an immovable target

Reference / values	Reference 1			Reference 2			Reference 3			Reference 4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Ref. coordinates [mm]	0	0	1,800	0	5,000	1,800	5,000	0	1,800	5,000	5,000	1,800
Max. deviation mea. value [mm]	-43	-58	1,893	75	4,943	1,943	4,947	-62	1,965	4,948	4,949	1,624
Mea. error [mm]	43	58	93	75	57	143	53	62	165	52	51	176

Fig. 6. NLOS environment test.

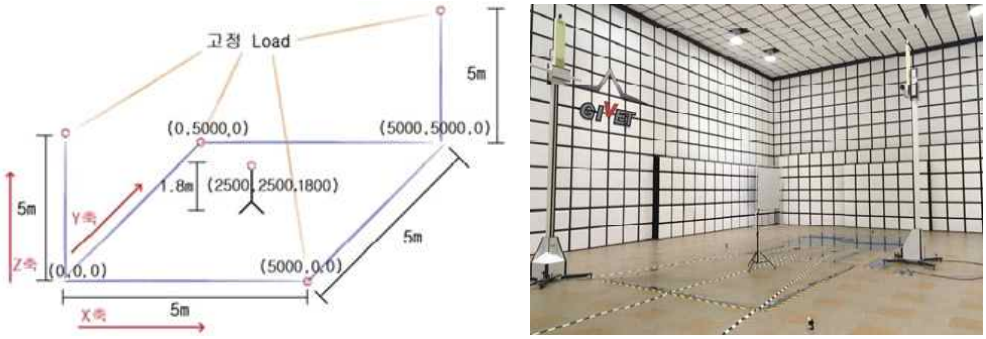

Fig. 7. anechoic chamber test.

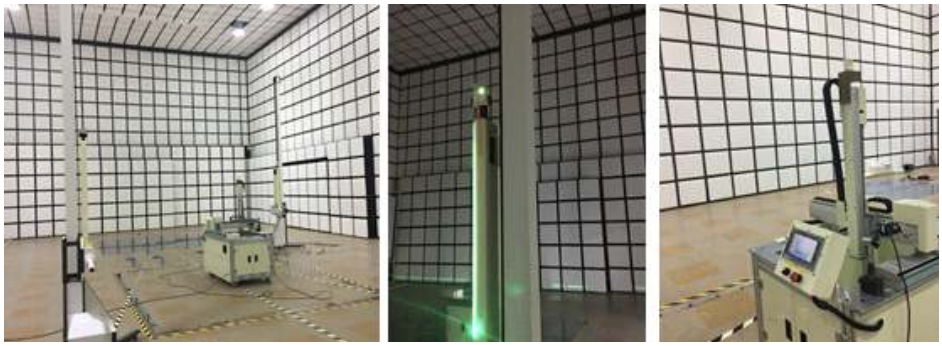

Fig. 8. Electromagnetic anechoic chamber test environment.

3축 로봇에 장착되어 움직이는 태그의 위치를 측정한 결과는 Table 4에서와 같다. 본 실험에서도 x축 및 y축 방향으로는 비교적 양호한 위치 정밀도를 나타내었지만 z축 방향으로는 측위 오차가 상대적으로 크다는 것을 확인하였다.

따라서 측위 좌표값의 정밀도 향상을 위한 측위 데이터에 필터를 적용하였는데, 여기서 필터로는 MA (moving average)와 칼만 필터를 이용하였다. 즉 기준 좌표 (2700, 2700)에 태그를 위치시킨 후 측정한 데이터를 MA와 칼만 필터를 적용하였는데, 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 380여회 정도의 측정을 진행하였는데, 그 결과는 Fig. 9에서와 같다.

다수의 고정 앵커들이 설치된 공간에서 움직이는 노드의 측위값에 MA와 칼만 필터를 적용한 결과인 Fig. 9로부터 MA와 칼만 필터를 적용하면 위치 측정 오차가 확연히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Fig.

Table 4. Measurement data of orthogonal reciprocating motion using testbed

Axial direction		Ref. coordinates [mm]	Mea. value [mm]	Mea. error [mm]
x axis	Min.	2,800	2,760	40
	Max.	3,190	3,191	41
y axis	Min.	2,700	2,730	30
	Max.	3,090	3,053	37
z axis	Min.	1,500	1,321	179
	Max.	1,890	1,985	95

9에서 같이 380여 회에 걸쳐 측정한 결과의 통계는 Table 5에서와 같은데, 여기서 MA와 칼만 필터를 적용하여 획득된 위치 값에 대한 위치 오차들을 확인할 수 있다. 즉 수치상으로도 칼만 필터를 적용한 결과가 측위 오차가 적고 그래프를 통해서도 이를 확인할 수 있었다.

4.2 무반향실에서의 위치 추적 시험

마지막으로 실제 자동차 조립 공정에서 공구의 측위 정밀도를 파악하기 위한 실험을 진행하였는데, 자동차 조립 공정과 유사한 환경의 자동차 정비 공장에서 실험을 진행하였다. 고정 앵커는 리프트의 네 기둥에 장착하고, 태그는 공구에 부착하여 공구의 이동 경로를 Fig. 10에서 같이 측정하였다.

Fig. 10. Tool position tracking experiment in real working environment.

자동차 모형에서 작업하고 있는 공구의 현재 위치를 표시할 수 있도록 Fig. 11에서와 같은 작업 모니터

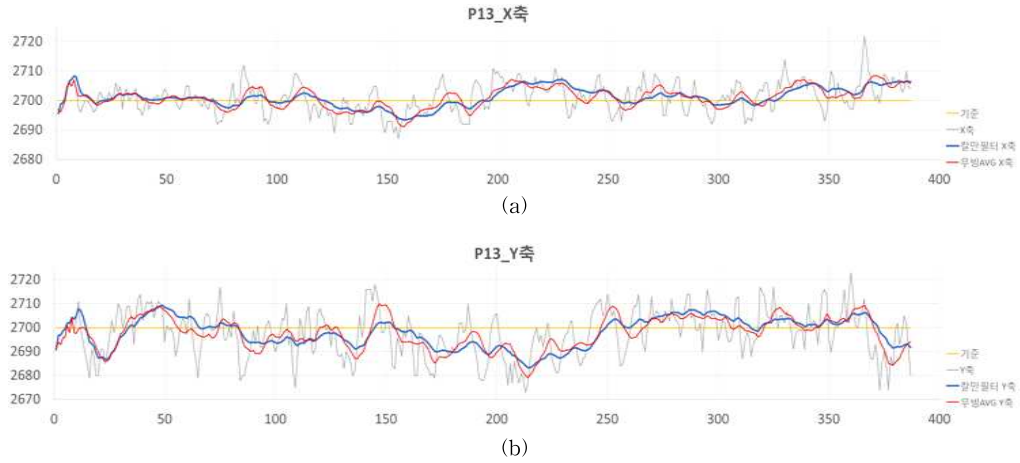

Fig. 9. Measurement results using MA (red line) and Kalman filter (blue line) of (a) X axis and (b) Y axis.

Table 5. Measurement data from sensor units and filtering results

Measurement	Mea. value [mm]		Applying MA [mm]		Applying Kalman Filter [mm]	
	x	y	x	y	x	y
Min.	2687	2673	2691.2	2679.2	2693.4	2683.23
Max.	2722	2723	2709.6	2710.9	2708.43	2709.4
Max.-Min.	35	50	17.4	30.7	15.03	26.17

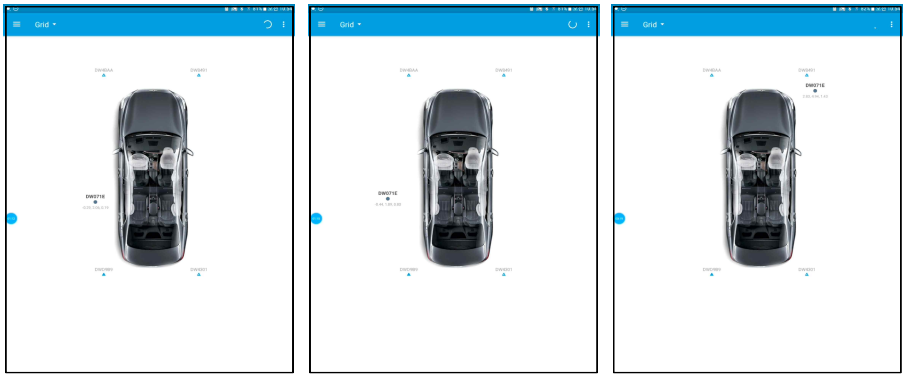

Fig. 11. Monitoring display of the position of the tool.

링 애플리케이션을 제작하여 공구의 위치를 표현하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 자동차 생산 등의 조립 공정에서 요구되는 조립 작업 시 사용되는 공구의 위치를 보다 정확하게 확인하고 모니터링할 수 있는 시스템을 제안하였다. 제안한 측위 모니터링 시스템은 UWB 통신 모듈과 MEMS IMU 센서를 조합한 형태로서, 태그와 앵커의 UWB 모듈은 서로 간에 신호를 전송하여 송수신 시간을 측정한 후 이를 통해 태그와 앵커 간의 거리를 예측하는 역할을 하고, MEMS IMU 센서는 가속도계, 각속도계, 지자기계 및 고도계를 통해 측위 보정 정보를 제공하는 역할을 한다. 이동 노드인 태그는 이동하는 공구에 부착되어 공구의 3차원 위치를 측정하여 좌표 데이터를 앵커에 전달하는 기능을 수행하므로, 특정 공구가 정해진 규정에 맞게 제대로 사용되었는지에 대한 여부를 확인할 수 있어 생산 현장에서의 조립 불량 가능성을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCE

[1] A. Gilchrist, *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*, Apress, New York, 2016.

[2] A. Khan and K. Turowski, "A Perspective on Industry 4.0: From Challenges to Opportunities in Production Systems," *Proceeding of International Conference on Internet of Things and Big Data*, pp. 441-448, 2016.

[3] S. Gezici, Z. Tian, G.B. Giannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor, et al., "Localization via Ultra-Wideband Radios," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No. 4, pp. 70-84, 2005.

[4] J. Hu, Y. Zhu, S. Wang, and H. Wu, "Energy Efficient, Reconfigurable, Distributed Pulse Generation and Detection in UWB Impulse Radios," *Proceeding of IEEE International Conference on Ultra-wideband*, pp. 773-777, 2009.

[5] F. Alonge, E. Cucco, F. D'Ippolito, and A. Pulizzotto, "The Use of Accelerometers and Gyroscopes to Estimate Hip and Knee Angles on Gait Analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 5, pp. 8430-8446, 2014.

[6] T.K. Kim, J.D. Seo, D.H. Lee, E.U. Kang, and S.G. Kwon, "Noise Reduction and C-Scan Image Shaping of Ultrasonic Signal for Welding Quality Inspection," *Journal of Korea Multimedia Society,* Vol. 20, No. 10, pp. 1662-1670, Oct. 2017.

[7] L. Yang and G.B. Giannakis, "Ultra-wideband Communications: An Idea Whose Time Has Come," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 21, No. 6, pp. 26-54, 2004.

[8] A. Mallat and L. Vandendorpe, "Joint Estimation of the Time Delay and the Clock Drift and Offset Using UWB Signals," *Proceeding of 2014 IEEE International Conference on Communications*, pp. 5474- 5480, 2014.

권 성 근

1996년 경북대학교 전자공학과 학사
1998년 경북대학교 전자공학과 석사
2002년 경북대학교 전자공학과 박사

2002년~2011년 삼성전자 무선사업부 책임연구원
2011년~현재 경일대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 멀티미디어 암호, 모바일 방송, 워터마킹