

# 칼만필터를 적용한 UWB 센서기반 제조업 조립공정작업의 실시간 위치추적 시스템 개발

정승현\*, 최득성  
영남이공대학교 전자정보계열

## Development of a Real-Time Position Tracking System for a Manufacturing Process Based on a UWB Sensor Using a Kalman Filter

Seung-Hyun Jeong\*, Deuk-Sung Choi  
Division of Electronics & Information Engineering, Yeungnam University College

**요약** 일반적인 기계나 자동차 등의 제조업 조립공정은 공정별 흐름에 근접센서, 바코드, RFID, ZigBee, Bluetooth, 무선 센서 네트워크 등의 유무선 정보 수집 장치를 활용하여 실시간으로 공정 진행 정보를 네트워크를 통하여 상위의 제조 실행 시스템 MES(Manufacturing Execution System) 서버로 수집하는 방식으로서 공정의 흐름을 파악하고 생산량을 점검하기에 적합하나 개별 작업자의 해당 작업장 내에서의 작업 누락이나 동선 파악을 위한 실시간 위치 추적은 어려운 실정이다. 이를 극복하기 위하여, 작업자 공구의 실시간 위치 추적시스템 도입을 통해 공구의 위치 및 궤적을 실시간으로 분석하여 작업자에게 일관된 작업 순서를 지시하고 작업의 누락 및 가감을 체크한다면, 비숙련공이나 실수에 의해서 조립공정에서 발생할 수 있는 조립불량을 작업자에게 실시간으로 알려주거나 사전에 차단하여 생산성 및 품질향상을 이룰 수 있다. 이를 위하여, 전동공구의 기계적인 진동 및 무선통신 노이즈를 제거하고 측정신호의 정밀도 향상을 위하여 칼만필터를 적용한 UWB(Ultra Wide Band) 삼변측량 기반의 실시간 공구 위치 추적 센서시스템을 개발하였고 이동평균필터에 비해 약 21%의 무선측정 성능개선을 통하여 그 효용성을 증명하였다.

**Abstract** Assembly process data can be gathered in real time in a manufacturing execution system (MES) server using proximity sensors, barcodes, RFID, ZigBee, Bluetooth, wireless sensor networks, etc. Although this is suitable for identifying process flow and checking production progress, it is difficult to trace the location of individual workers in real time for missing work or trajectories within the work area. To overcome this, the location and trajectory of the working tool can be analyzed in real time through a position tracking system of an operator's working tool. It can instruct the operator to perform a consistent working process. Productivity and quality improvement can be achieved by an alarming or blocking operator with possible assembly defects during the assembly process in real time. To this end, we developed a real-time tool position-tracking sensor system based on Ultra Wide Band (UWB) trilateration using a Kalman filter to eliminate mechanical vibration and radio communication noise.

**Keywords** : Tracking, Assembly Process, UWB, Trilateration, Kalman Filter

---

\*Corresponding Author : Seung-Hyun Jeong(Yeungnam University College)

email: bugman@ync.ac.kr

Received December 24, 2019

Accepted February 7, 2020

Revised January 29, 2020

Published February 29, 2020

## 1. 서론

자동차나 기계장치의 제조업 조립공정 산업의 특징은 모듈생산방식으로 복수의 부품들을 조립하여 모듈이라는 하나의 보다 큰 복합부품단위를 만들어 이를 최종 조립 라인에 투입함으로써 최종생산의 복잡성을 줄이는 생산 방식으로 생산의 복잡성을 줄여 작업의 유연성 및 간소화를 이루고 작업자들의 탈숙련화를 도와 생산성 향상에 크게 기여할 수 있다.

일반적으로, 생산현장에서는 일련의 흐름으로 이루어진 조립공정에 대한 개별 지시정보의 수신과 작업자의 작업 진행상태 및 실적정보를 상위의 제조 실행 시스템 MES(Manufacturing Execution System) 서버에 효율적으로 전송하기 위하여 공정별 흐름에 근접센서, 바코드, RFID, ZigBee 무선 센서네트워크 등의 유무선 정보 수집 장치를 활용하여 실시간으로 공정진행 정보를 수집하는 방식이 주로 사용되어 지고 있다. 그러나, 이러한 방식은 센서가 장착된 위치에서 조립공정의 진행상태를 수신할 수 있으며 케이블포설의 불편함을 제거할 수 있으나, 공정 작업자의 작업 공간영역에서의 시간별 작업계획이나 현재의 공정 위치추적 및 작업진행상태 모니터링에서는 어려운 점이 있다[1].

본 논문에서는 작업공구에 UWB(Ultra Wide Band) 센서를 적용한 무선 위치추적 태그를 부착하여 공구의 시간적인 궤적 및 실시간 위치 측정을 할 수 있는 시스템의 도입을 통해, 시간의 순서에 따른 공구의 위치를 파악하고 수집된 데이터의 분석을 통해 작업자에게 일관된 작업 순서를 지시하면서 작업의 누락 및 가감을 자동으로 체크하고, 공정에서 발생할 수 있는 조립불량을 사전에 차단하여 조립공정의 생산성 및 품질향상을 달성하고자 한다.

이를 위하여, 칼만필터를 활용하여 무선으로 수집된 위치추적 데이터에서의 노이즈 제거하고 최적화시킨 후 공정분석 어플리케이션과 연동하여 공구의 작업 위치를 실시간으로 파악하여 시간적인 작업과정을 분석할 수 있는 제조업 조립공정 분석 시스템을 제시하고자 한다.

TWR(Two Way Ranging)기반의 협업무선추적은 개체 간에 무선 통신을 통하여 개체간 거리 및 상대 위치를 구하는 방법으로서 측위 구성요소의 이동이 자유롭고 측위 정보 외에도 무선통신을 통하여 다른 정보를 공유할 수 있는 장점이 있다[2]. 또한, 무선 측위 시스템의 정밀도를 높이기 위해 거리 측정 단계에서의 거리 값을 보정하는 방법과 비가시성 환경에서 발생하는 오차들을 최소화

화시켜 효율적으로 송신기들을 선택하는 방법이 있다[3]. 또한, 합성곱 신경망(CNN : Convolutional Neural Network) 기반의 거리측정은 딥러닝 모델을 통한 거리 추정 기법으로서 3m이상의 먼 거리를 측정하는데 유효함을 보였다[4].

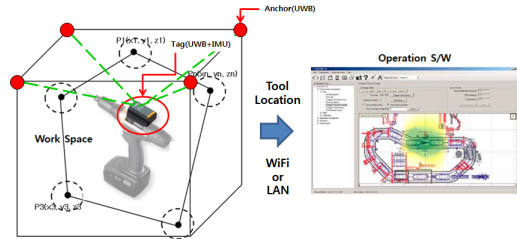


Fig. 1. Tool Position Tracking System for Automotive Assembly Process

Fig. 1은 전체 시스템의 구성도로서 UWB무선추적 태그를 전동공구탑재에 탑재하고 3차원 공간상에서의 위치 측정용 고정노드인 앵커를 4개소의 포인트에 설치하여 실시간 공구의 작업위치를 측위 한 후 Wi-Fi 무선네트워크를 통하여 어플리케이션으로 데이터를 전송하고 시간대별 공구의 궤적을 분석하여 작업시간, 조립작업의 상태 등을 점검하고 작업자에게 알리며 상위의 MES시스템으로 보고 한다.

## 2. 본론

### 2.1 UWB 측정용 센서보드의 개발

본 논문에서는 실시간 공구의 위치추적을 위하여 UWB 트랜시버 IC를 내장한 Decawave사의 DWM1000 모듈과 데이터 수집 및 운영소프트웨어와의 무선통신을 위하여 ARM 계열인 Cortex-M3을 사용하여 이동노드인 태그보드와 고정 노드인 앵커보드를 개발하였다. 태그의 위치데이터 및 알람정보를 송수신하는 역할을 하는 DWM1000 모듈은 IEEE 802.15.4-2011 UWB 표준을 따르는 무선 주파수 3.5GHz~6.5GHz 대역의 DW1000 UWB 트랜시버 IC를 기반으로 RF회로 및 안테나를 내장하고 있으며, TWR(Two Way Ranging) 알고리즘을 사용하여 태그와 노드사이의 거리를 측정하고, 삼변측량법 알고리즘을 활용하여 태그를 탑재한 대상의 상대적 위치를 측정할 수 있다.

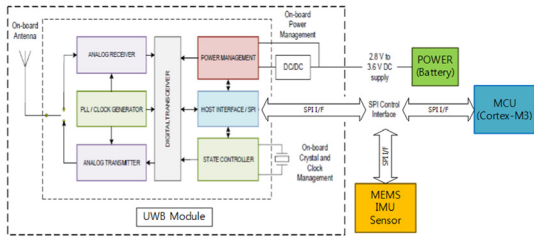


Fig. 2. UWB Tag Block diagram

실시간 위치추적을 위하여 작업자의 공구에 부착 되어 지는 이동노드인 Fig. 2의 태그보드는 3차원 위치를 측정하여 좌표데이터를 앵커에 전달하는 기능을 수행하며, 고정노드인 Fig. 3의 앵커보드는 각 앵커와 태그사이의 거리를 확인하기 위한 장치로 일정한 위치에 고정 설치가 된다. 또한, 태그에서 수집된 위치데이터 및 알람정보를 Wi-Fi나 Ethernet을 통해 위치추적 어플리케이션으로 전달해주는 역할을 수행한다.

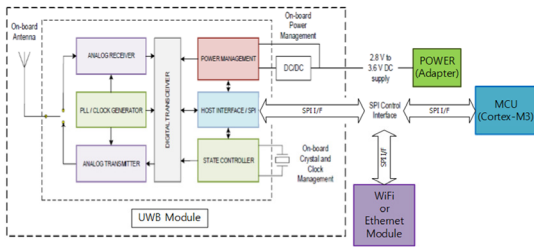


Fig. 3. Anchor Node Block diagram

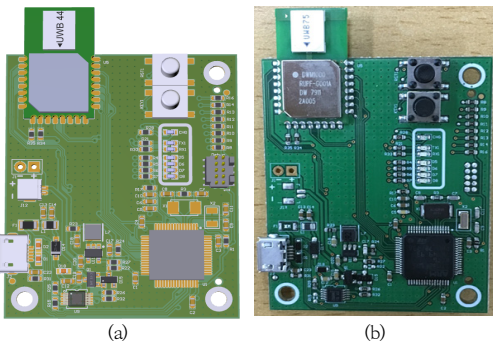


Fig. 4. Developed UWB Tag & Anchor Board  
(a)PCB 3D Modeling (b)UWB Board

Fig. 4는 개발 되어 진 UWB 태그 및 앵커 겸용보드로서 공구에 탈부착 및 고정이 쉽게 소형 및 경량화에 중점을 두고 개발하였다. 또한, 덩스위치로 앵커나 태그기능

중 하나를 선택할 수 있으며, 마이크로 5핀 B형 USB포터를 통하여 전원공급 및 PC와의 통신기능 수행하고, 충전 IC로 BQ24092 Single Cell Li-Pol Battery Charger IC를 탑재하였다.

## 2.2 테스트 베드의 제작

3차원 공간상의 직교 좌표 내에서 정확한 위치이동, 좌표 내에서의 반복적 위치 측정을 목적으로 x축 400mm, y축 700mm, z축450mm의 스트로크를 가지는 직교좌표 테스트 베드를 제작 하여 무선 위치 측정의 신뢰성을 확보 하였다. Fig. 5는 제작되어진 테스트 베드로서 정밀반복 위치제어 구현을 위하여 저관성, 정격회전 속도 3000r/min, 20:1 감속기, 100W급 서보모터와 가감속 프로파일, 고속 진동제어 및 동기제어 기능이 내장되어 있는 모션컨트롤러를 사용하였다.

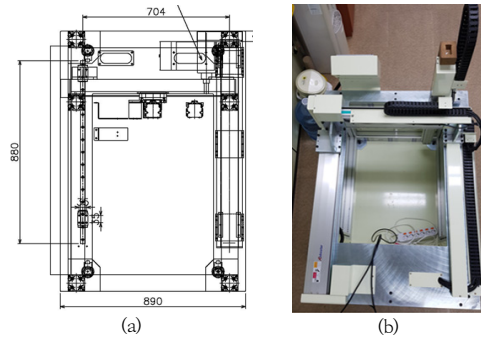


Fig. 5. Test Bed for Repetitive Test  
(a)Test Bed Drawing  
(b)Test Bed for Space Coordinates

## 2.3 노드간 거리 측정 알고리즘

Fig. 6의 TWR 알고리즘은 앵커가 펄스를 전송한 후 반대편에서 이 펄스를 수신한 태그가 다시 펄스를 송신하여 두 노드 사이에 펄스의 왕복시간을 계산 한 뒤 노드의 처리 시간을 제외하여 노드 간의 거리를 계산하는 방법이다. IEEE802.15.4a 기술표준에서는 위치인식을 위한 거리 측정 방식으로 TWR 알고리즘을 제안하고 있다. 이러한, TWR방식은 각각의 구성요소들 간에 동기를 맞추지 않아도 된다는 점에서 시스템을 간소화 할 수 있다는 장점이 있다[5].

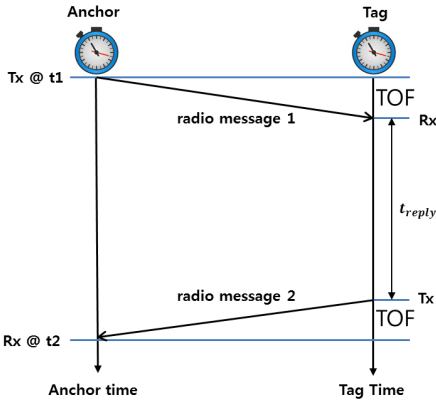


Fig. 6. Elapsed Time of Two Way Ranging measurement

TOF(Time Of Flight) 시간은 Eq. (1)과 같이 타임스탬프  $t_2$ ,  $t_1$ 과 응답시간  $t_{reply}$ 을 이용하여 구할 수 있다.

$$TOF = \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2} \quad (1)$$

Where,  $t_1, t_2$  denotes time stamp,  $t_{reply}$  denotes reply time

또한, 라디오 전파는 공기를 통해서 전달되므로 빛의 속도  $C$ 와 같고, 앵커와 태그 사이의 거리는 Eq. (2)에 의해 계산 되어 질수 있다.

$$Distance = c \times \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2} \quad (2)$$

Where,  $C$  denotes velocity of light

그러나 이러한 무선통신 기반 거리측정은 장애물이나 실내 주변 환경의 변화로 인하여 거리 오차가 발생하면 정확한 위치 인식을 할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 거리 측정 오차를 줄이기 위하여 제안되고 있는 삼변측량 기반 위치인식 기법들은 확률론을 이용한 위치 인식 기법, 지역 유사성을 이용한 위치인식 기법, 그리고 토폴로지를 이용한 위치인식 기법으로 분류할 수 있다[6].

UWB 삼변측량법은 수평각을 관측하는 대신에 세변의 길이를 측정하여 삼각점의 위치를 구하는 알고리즘으로, Fig. 7에서 표시되어진 세 점의  $(x, y)$ 좌표(0,0),  $(a,0)$ ,  $(b,c)$ 를 이용하여 각 원의 방정식을 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

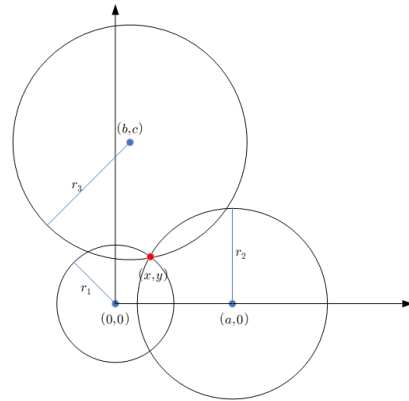


Fig. 7. Trilateration for Position Tracking

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= r_1^2 \\ (x - a)^2 + y^2 &= r_2^2 \\ (x - b)^2 + (y - c)^2 &= r_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Where,  $a, b, c$  denotes coordinates of  $(a,0)$ ,  $(b,c)$

또한, Eq. (3)의 연립방정식을 풀면 Eq. (4)와 같다. 여기에, Eq. 2를 이용하여 이동 태그와 고정 앵커 사이의 세변의 길이  $r_1, r_2, r_3$ 를 구하고, 앵커 설치좌표  $(0,0)$ ,  $(a,0)$ ,  $(b,c)$ 를 적용하면 공구에 부착되어진 태그의 상대적 위치를 측정 할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + a^2}{2a} \\ y &= \frac{r_1^2 - r_3^2 + b^2 + c^2 - 2bx}{2c} \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.4 칼만필터를 사용한 측정오차 보상

제조업의 조립 공정에서 쓰이는 공구는 주로 전동 공구로서 작업 시 발생하는 모터의 물리적 진동에 의해서 연속적인 측정오차가 발생할 수 있으며, 통신 지연, 전파 간섭 등의 잡음에 의한 무선측정오차가 발생할 수 있다.

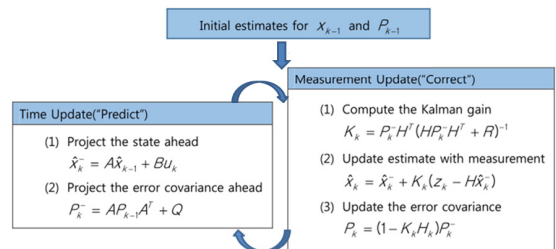


Fig. 8. Kalman Filter Algorithm

이를 보상하고자 본 논문에서는 Fig. 8의 칼만필터 알고리즘을 도입하여 측정된 데이터에 포함된 진동 및 무선 노이즈를 제거하고 측정의 정밀도를 향상 시켰다. 일반적으로, 저주파 통과필터는 측정된 데이터에 대하여 고정된 가중치가 적용되어, 시스템의 외부환경변화에 민감하게 반응하지 못한다. 한편, 칼만 필터의 경우 상태 변수 추정 값  $\hat{x}_k$ , 오차 공분산  $P_k$  및 시스템 모델  $A, Q$ 를 이용하여 매번 다른 가중치를 적용함으로써 외부환경 변화에 따라 최근 획득된 데이터가 잡음이 많이 포함된 값 이더라도 비교적 정확한 추정치를 얻을 수 있는 특성이 있다.

### 2.5 테스트베드를 이용한 반복 시험

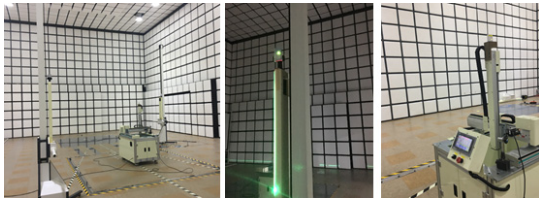


Fig. 9. Repeated Experiment Using Test Bed in Electromagnetic Reflective Laboratory

Fig. 9는 특정 위치의 반복 정밀도 측정시험의 신뢰성 확보를 위하여 전자파 무반향실 내 5m×5m×5m(가로×세로×높이)의 공간상에서 고정 Anchor 4개를 설치하고 정사각형 바닥면적 중간위치에 Tag를 장착한 3축 직교로봇을 위치하여 x, y축 방향으로 일정한 거리의 반복 측정 시험환경을 조성하였다.

Fig. 10, 11는 직교로봇을 이용하여 X, Y축으로 2700mm 위치이동을 250 회 반복 하였을 때 원래의 측정데이터와 이동평균필터와 칼만필터를 통과한 후의 데이터를 비교한 그래프이다.

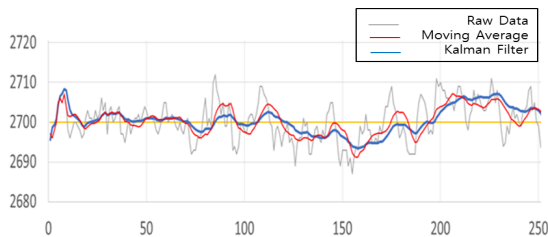


Fig. 10. Graph of X-axis with Moving Average and Kalman Filter

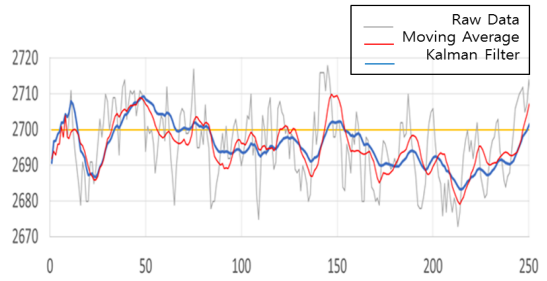


Fig. 11. Graph of Y-axis with Moving Average and Kalman Filter

Table 1은 2700mm 반복 이동시 필터통과전의 측정 오차 PP(Peak to Peak) 값과 이동평균필터와 칼만필터를 적용 한 데이터의 측정 오차를 비교한 것으로서 X축은 35mm에서 15mm로, Y축은 50에서 26.2mm로 측정 오차가 줄어드는 알 수 있다.

Table 1. 2700mm Repeated Experiment of X, Y Axis

Pos	Measured Data (mm)		Moving Average(mm)		Kalman Filter (mm)	
	x	y	x	y	x	y
MIN	2687	2673	2691.2	2679.2	2693.4	2683.2
MAX	2722	2723	2709.6	2710.9	2708.4	2709.4
PP	35	50	18.4	31.7	15.0	26.2

칼만필터와 이동평균 필터의 PP데이터를 확인해 보면 수치상으로는 비슷한 결과를 보이는 것 같지만 Fig. 10, 11와 같이 실제 데이터를 그래프로 나타내었을 때 칼만 필터의 결과값이 부드럽고 측정 오차가 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

### 2.6 위치측정 실험

Fig. 12의 (a)(b)는 무선측위 실험을 위한 환경구성으로서 실내의 장애물이 없는 LOS(Line of sight) 환경 및 장애물이 있는 NLOS(None Line of sight) 환경에서 Fig. 12의 (c)의 3개의 고정좌표 (0,0), (a,0), (b,c)에 해당하는 (0m,0m), (0m,5m), (2.5m,5m) 위치에 고정노드 앵커를 설치하고, 임의의 여러 위치에서 이동노드인 태그의 상대적인 위치측정 실험을 실시하였다.

### 3. 결론

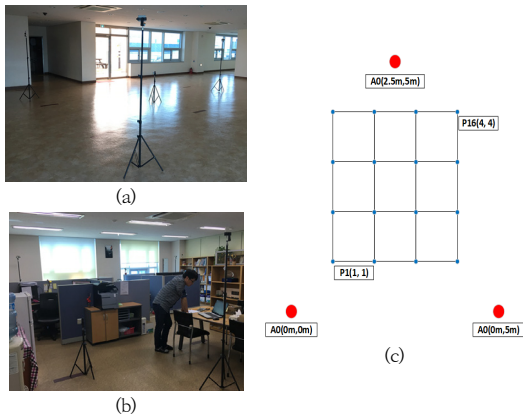


Fig. 12. LOS and NLOS Environment Test  
 (a) LOS Environment (b) NLOS Environment  
 (c) Coordinates of 3 Anchors and 16 Test Points

Table 2. LOS Environment Trilateration Test  
 (Unit : mm)

Pos	Real Pos		Measured Pos		Error	
	x	y	x	y	x	y
P1	1000	1000	879	1139	121	-139
P2	1000	2000	892	1868	108	132
P3	2000	3000	1885	3154	115	-154
P4	2000	4000	1902	3852	98	148
P5	3000	1000	2895	1101	105	-101

Table 3. NLOS Environment Trilateration Test

Pos	Real Pos		Measured Pos		Error	
	x	y	x	y	x	y
P1	4910	1250	5182	1165	-272	85
P2	4010	440	4113	637	-103	-197
P3	3110	5750	3074	5783	36	-33
P4	870	4000	683	4047	187	-47

Table 2는 그림 12의 (a),(c)의 LOS실내 환경의 5개 지점에서 위치를 측정된 결과로서 x좌표의 최대오차값은 121mm이며 y좌표의 최대 오차값은 -154mm이었다. 이는 LOS실내 환경목표치인 위치측정오차 ±200mm이하를 만족하는 값으로써 개발한 시스템이 LOS 실내 환경에서 위치측정이 잘 이루어짐을 보여준다. Table 3는 NLOS 환경인 그림 12(b)의 실내 환경의 4개 지점에서 위치를 측정된 결과로써 x좌표의 최대 오차값은 -272mm이며 y좌표의 최대 오차값은 -197mm 이었다. 실험의 결과로서 NLOS 환경에서는 LOS 환경에 비해 다소 높은 위치 측정오차를 보임을 알 수 있다.

Fig. 13은 실제 작업환경상의 작업공구의 위치추적 테스트를 위하여, 조립공정 산업의 작업 환경과 유사한 자동차 정비공장의 휠 조립과정에서 위치측정 시험을 진행한 결과로서, 작업 현장에 4개의 위치에 앵커를 설치하고 작업자의 공구에 태그를 부착하여 태블릿 PC상의 위치추적 어플리케이션과의 연동을 확인하였다. 이를 통하여 개발 되어진 시스템이 조립공정 작업자의 시간에 따른 작업 공구의 위치추적이 가능하며 데이터 분석을 통하여 작업자에게 일관된 시간적인 작업 순서를 지시하면서 작업자의 실수에 의한 작업의 누락 및 가감을 체크할 수 있음을 알 수 다. 또한, 조립 공정 라인에서 작업자에 의한 조립불량 및 제조공정에서 발생할 수 있는 공정불량을 사전에 차단하여 조립공정 산업의 생산성 및 품질향상을 이루고자 한다.

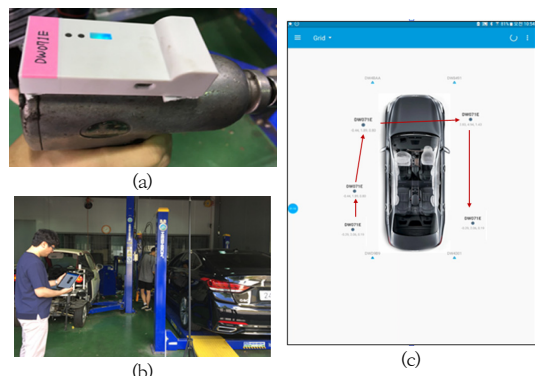


Fig. 13. Tool Tracking Application Test  
 (a) Tag Attached electric screwdriver  
 (b)Auto Shop Field Test (c) Tool Tracking Application

### References

- [1] M. D. Kong, "A Study on the Efficient MES Using RFID in automotive Assembly Line", *Journal of the Korea Management Engineers Society*, Vol.16, No.1, pp.45-55, March, 2011.
- [2] J. M. Lim, and T. K. Sung, "Analysis of Error Propagation in Two-way-ranging-based Cooperative Positioning System", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.21, No.9, pp. 898-902, Sep, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/I.ICROS.2015.15.0039>
- [3] S. Y. Go, "Effective ToA-Based Indoor Localization Method Considering Accuracy in Wireless Sensor

Networks”, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.41, No.06, pp.640-651, June, 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/kics.2016.41.6.640>

- [4] G. M. Nam, T. Y. Jung, S. H. Jung and E. R. Jeong, “Distance Estimation Using Convolutional Neural Network in UWB Systems”, *Institute of Information and Communication Engineering*, Vol 23 ,No.10, pp.640-651, Oct, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2016.41.6.640>
- [5] Y.S Nam, J. G. Lim, and I. K Jang, “Ranging Performance Evaluation of Relative Frequency Offset Compensation in High Rate UWB”, *Journal of the Korea Contents Association*, Vol.9, No.7, pp.76-85, July, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.5392/JKCA.2009.9.7.076>
- [6] S. W. Kim, T. H. Kim and S. W Tak, “ Performance Evaluation of RSSI-based Trilateration Localization Methods”, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 15, No.11, pp.2488-2492, Nov. 2011.

---

정 승 현(Seung-Hyun Jeong)

[정회원]



- 2009년 2월 : 영남대학교 전자공학 (공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 전자정보계열 조교수

<관심분야>

회로설계, 제어공학

---

최 득 성(Deuk-Sung Choi)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
- 2010년 9월 ~ 현재 영남이공대학교 전자정보계열 부교수

<관심분야>

반도체공정, 소자