

정밀한 무선측위 기반 CPS를 위한 SDS-TWR 거리측정 기법의 성능 평가

유준혁*, 김희철^o

Performance Evaluation of SDS-TWR Ranging Algorithms for CPS Based on Accurate Wireless Localization

Joonhyuk Yoo*, Hiecheol Kim^o

요약

거리 기반 실시간 측위 시스템에서 보다 정확한 측위가 가능하기 위해서는 우수한 측위 알고리즘과 함께 거리 측정의 정확도 확보도 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 두 노드 간의 실제적인 거리측정의 정확도를 평가하기 위해 기존의 Symmetry 가정이 제거된 SDS-TWR 거리계산식 유도에 의한 정성적인 분석을 수행하고, 개발된 센서노드를 활용해 테스트 네트워크를 구축한 후 실험결과에 의한 정량적인 평가를 동시에 수행한다. 본 연구에서 구현된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택을 탑재한 센서노드 환경이 기존 나노트론사의 상용 참조보드 환경보다 평균 약 60% 감소된 거리측정 오차율을 산출하여 상대적으로 매우 높은 거리측정 정확도를 보인다.

Key Words : Wireless Localization, IEEE 802.15.4a, Ranging Algorithms, Normal Mode, Fast Mode

ABSTRACT

Range-based real time localization systems require superior localization techniques as well as accurate ranging algorithms for better performance. To evaluate the ranging accuracy between two nodes in practical environments, this paper does not only present a qualitative analysis by computing a distance equation under SDS-TWR measurement model of no symmetry assumption, but also executes a quantitative evaluation by doing experiments after building up a test network employing the developed sensor node. Experimental results show that the ranging accuracy of the proposed implementation of IEEE 802.15.4a software stack is superior with smaller average error rate by 60% to one of the commercial Nanotron's reference development kit.

I. 서론

근거리 실시간 위치 정보를 기반으로 하는 사이버 물리시스템(CPS)은 주로 실내나 제한된 공간과 같이 정밀한 거리 측정이 요구되는 근거리에서 사용되며,

교통, 물류, 의료 및 보안 분야에서 다양한 위치 기반 서비스 제공이 가능해 최근 주목받고 있다^{1-5,16,17}. 기존 무선 측위의 대표적인 기술인 GPS는 위성신호와 삼변측량법을 이용하여 실시간으로 이동하는 물체의 위치를 제공하며 실외 환경 중심의 위치추적 시스템

* 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)10041146, 자율군집을 지원하는 웰빙형 정보기기 내장 소프트웨어 플랫폼 개발의 일환으로 수행되었음

• First Author : Daegu University, College of Information and Communication Engineering, joonhyuk@daegu.ac.kr, 정희원

^o Corresponding Author : Daegu University, College of Information and Communication Engineering, hckim@daegu.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2014-07-250, Received Juny 2, 2014; Revised August 18, 2014; Accepted August 18, 2014

구축에 가장 많이 활용되고 있다. 그러나 위성신호 수신에 어려운 실내 환경에 대해서는 저전력 무선통신 기반의 UWB, ZigBee, RFID나 WiFi 등과 같은 새로운 무선통신신호를 무선측위에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다^[6-8,18].

새로운 무선통신신호 방식으로 실제 산업 환경에 큰 관심을 받고 있는 기술로 IEEE 802.15.4a가 있는데, 이는 저전력 기반으로 데이터 통신과 함께 거리 측정을 동시에 할 수 있으며, 위치인식을 위해 UWB와 CSS(Chirp Spread Spectrum) 신호방식을 지원하고 있다^[9]. 본 논문에서 다루고자 하는 CSS 방식은 기존에 주로 사용되는 전파의 세기를 활용한 RSSI 기반 측위 방식 대신에 전파 도달 시간을 활용함으로써 거리 측정의 정확도를 제고하고 있다. 또한 방해 전파에 대한 내구성이 뛰어나, 무선 랜 등의 타 무선 통신 방식과도 함께 사용이 가능한 장점을 지니고 있다^[10].

일반적으로 측위방식에 거리를 사용하는 거리 기반 측위(Ranging-based localization) 시스템에서는 거리 측정에서 생기는 오차가 측위의 결과에 크게 영향을 미치기 때문에 정확한 측위가 가능하려면 우수한 측위 알고리즘과 함께 거리 측정의 정확도를 높여야 한다. 현재 거리 측정의 정확도에 대해서는 체계적인 연구가 측위 알고리즘에 비해 상대적으로 부족한 상황이며, 특히 실 환경에서의 구현 및 성능평가에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않은 상태이다.

본 저자의 앞선 논문^[11]에서는 CSS 신호방식을 지원하는 RF 칩인 나노트론사의 NA5TR1을 사용하여 센서노드를 제작하고, 제작된 센서노드에 탑재될 IEEE 802.15.4a MAC 소프트웨어 스택을 개발하였다. 이전 논문에서는 기존 나노트론사에서 제시된 SDS-TWR(Symmetrical Double Sided Two-Way Ranging) 일반모드 알고리즘의 symmetry 가정 하에서의 거리 계산식만을 제시하였고^[2,10], 거리 측정 기능을 구현하기 위한 안정된 하드웨어 및 HAL(Hardware Abstraction Layer)과 MAC(Medium Access Control) 프로토콜 소프트웨어를 자체적으로 설계하고 개발한 것에 중점을 두었기 때문에 구현된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택의 기능성 측면에서 검증한 실험결과를 제시한 바 있다^[11].

이에 반해 본 논문의 차별성과 기여점은, [11]에서 개발된 소프트웨어 스택에 SDS-TWR의 신속모드 기능을 추가하고 symmetry 가정이 제거된 일반모드와 신속모드의 거리 계산식을 제공하여 보다 실용적으로 확장하였고, 그에 맞게 소프트웨어 스택을 확장 구현하고 실 환경에서 실험을 통해 기존 나노트론사의 개

발보드에 탑재된 소프트웨어 참조 환경의 성능과 비교 분석하는 데 있다. 다시 말해, 본 논문은 거리 측정의 기능성 측면 보다는 제시된 기법들의 성능을 분석하여 거리 측정의 질적인 측면을 판정하는 데 중점을 두었고, 개발된 소프트웨어 스택이 탑재된 센서노드를 활용한 SDS-TWR 거리 측정 기법들의 우수성을 기존 나노트론사의 개발보드/소프트웨어 참조 환경과 비교해 다양한 성능평가 결과를 통해 입증했다는 점에 본 연구의 가치가 있다.

또한 본 논문은 거리 측정의 정확도에 대한 정성적인 분석이나 시뮬레이션 결과만을 제시했던 기존 연구들^[12-15]과는 달리 실제 산업 환경에서 부족한 거리 측정 정확도의 정량적인 실증자료를 제공하고자 시도하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장은 본 연구와 관련하여 이론적 배경이 되는 주요 기술적 주제를 간략히 설명한다. 3장에서는 본 연구에서 사용하는 SDS-TWR 기법의 거리계산식을 유도하고 거리 측정 정확도를 정성적으로 분석한다. 4장에서는 실험을 통해 나노트론사의 상용보드 참조 환경과 비교한 성능평가 결과를 정량적으로 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 기술적 배경

본 장에서는 본 연구에서 거리 측정을 지원하는 RF 칩으로 채택된 NA5TR1과 관련하여 CSS 기반의 SDS-TWR 거리 측정 기법에 대해 간략히 소개하고자 한다. 현재 2.4GHz 대역의 CSS를 지원하는 RF 칩은 독일의 나노트론사에서 제공되며, 국내외 다수의 업체에서 고정밀 위치추적 솔루션 개발에 활용되고 있다^[12,10-12]. 본 연구에서는 나노트론사의 NA5TR1 RF 칩을 탑재한 RF 모듈인 NanoPAN 5375 모듈을 사용하였다. NA5TR1 RF칩은 IEEE 802.15.4a PHY 표준이 규정하고 있는 CSS와 UWB Ranging 방식 중에서 CSS 방식만을 지원하고 있고, 2.4GHz의 ISM대역에서 동작하며, 80MHz 대역 및 22MHz 대역을 사용하는 Ranging 기능을 제공하고 있다.

SDS-TWR 거리 측정 기법은 NA5TR1 RF칩을 장착한 센서노드들 간의 거리 측정을 위해 나노트론사에서 개발된 알고리즘이다^[2,10]. SDS-TWR은 거리 측정 모드로서 일반모드(Normal Mode)와 신속모드(Fast Mode)의 두 가지 방식을 지원하고 있다. 그림 1에 비교한 바와 같이 일반모드는 두 노드 간에 서로 한번씩

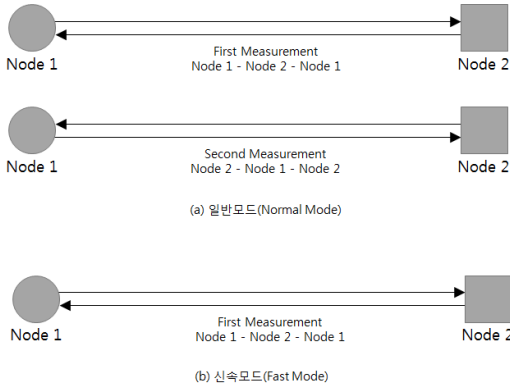


그림 1. SDS-TWR 거리측정 기법:일반모드 vs 신속모드
Fig. 1. SDS-TWR Ranging Methods:Normal Mode vs Fast Mode

MSG1 패킷과 ACK1 패킷을 주고받는 두 개의 라운드로 구성되며, 신속모드는 일반모드의 첫 번째 라운드로 구성된다.

그림 2는 SDS-TWR의 일반모드에서의 거리측정방식을 도시하고 있다. 측정대상 시간은 4가지로서, 첫 번째 라운드인 T_{roundA} 는 노드 A가 노드 B로 MSG1 패킷을 전송한 시점부터 노드 B로부터 ACK1 패킷을 수신하기까지 전송지연시간을 나타낸다. T_{replyB} 는 노드 B가 노드 A로부터 MSG1 패킷을 수신하고 ACK1 패킷전송을 개시하는 시점까지의 처리지연시간으로 정의한다. 한편, 두 번째 라운드인 T_{roundB} 는 노드 B가 노드 A로 MSG2 패킷을 전송한 시점부터 노드 A로부터 ACK2 패킷을 수신하는 시점까지의 전송지연

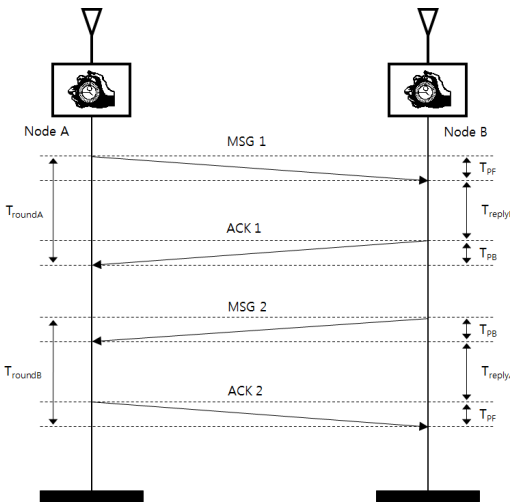


그림 2. SDS-TWR 일반모드에서의 시간 측정 동작
Fig. 2. Time Measurement in SDS-TWR's Normal Mode

시간을 나타내며, T_{replyA} 는 노드 A가 노드 B로부터 MSG2 패킷을 수신하고 ACK2 패킷을 전송하기까지 처리지연시간으로 정의한다.

SDS-TWR 기법은 일반모드이든 신속모드이든 이 과정에서 측정된 시간 값을 이용해 두 노드간의 거리를 계산한다^[11,12,14,15]. 기본적으로, symmetry 오류가 없는 이상적인 경우, 일반모드에서의 거리 d 는 식 (1)의 연립방정식으로부터 식 (3)과 같이 계산된다. 식 (3)에서 $c = 3 \times 10^8 (m/s)$ 는 전자파의 전파속도로 정의된다.

$$\begin{cases} T_{roundA} = T_{replyB} + 2T_p \\ T_{roundB} = T_{replyA} + 2T_p \end{cases} \quad (1)$$

$$T_p = \frac{(T_{roundA} - T_{replyA}) + (T_{roundB} - T_{replyB})}{4} \quad (2)$$

$$d = T_p \cdot c \quad (3)$$

III. SDS-TWR 거리측정 정확도의 정성적인 분석

본 장에서는 상기한 SDS-TWR 거리측정 알고리즘의 시간 측정 동작에 실제적인 하드웨어 구현을 하면서 발생하는 각 노드 간의 clock frequency offset 에러를 추가하여 다시 모델링하고, 이에 따른 두 노드 사이의 비대칭성(Asymmetry)을 고려한 거리 계산식을 유도하여 SDS-TWR 거리측정의 정확도를 정성적으로 분석하고자 한다.

대부분의 기존 연구들은, 정방향(노드 A에서 노드 B로)과 역방향(노드 B에서 노드 A로)에 대해 동일한 패킷전파시간을 가진다, 즉 $T_{PF} \approx T_{PB} \equiv T_p$ 라 가정하고, 두 노드 사이의 응답지연시간은 동일하다, 즉 $T_{replyA} \approx T_{replyB}$ 하다고 가정하여 단순화된 거리 계산식을 도출하였다^[11,12,14]. 하지만 이는 이상적으로 단순화된 경우이고, 실제적인 구현의 경우에는 각 노드의 clock frequency offset에 따른 비대칭성(asymmetry)이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 실제 구현상에 존재하는 clock frequency offset 에러를 고려하여 asymmetric 노드들 사이에 SDS-TWR 일반모드와 신속모드의 두 가지 거리측정 기법에 대한 거리 계산식을 유도한다. SDS-TWR 일반모드의 경우, 관련연구 [13]에서도 본 논문과 유사한 가정 하에서 동일한 거리 계산식을 유도한 바 있으나, 본 연구에서는 신속모드까지 확장하였다. 노드 A와 노드 B에서 사용하는 time basis, 즉

클럭 속도의 차이로 인해 clock frequency offset 에러인 e_A 와 e_B 가 발생하여 $\Delta T_{reply} = T_{replyA} - T_{replyB} \neq 0$ 이 되는 상황을 고려하면, 식 (2)의 패킷전파시간은 식 (4)와 같이 재해석된다.

$$T_p(\Delta) = \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &(1+e_A)T_{roundA} - (1+e_B)T_{replyB} \\ &+ (1+e_B)T_{roundB} - (1+e_A)T_{replyA} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

그러므로 symmetry 오류가 있는 실제적인 경우, 일반 모드에서에서의 거리계산은 식(5)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} d(\Delta) &= d + \Delta d \\ &= d(1+e_{AB}) \\ &= T_p(\Delta) \cdot c \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $T_p(\Delta)$ 는 식 (6)으로 간략화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} T_p(\Delta) &= T_p + \Delta T_p \\ &= T_p(1+e_{AB}) \\ &= T_p \left\{ 1 + \left(\frac{e_A + e_B}{2} \right) \right\} + \frac{\Delta T_{reply}}{4} (e_B - e_A) \end{aligned} \quad (6)$$

한편, 각 노드의 clock frequency offset에 기인한 최종 측정값의 오류 e_{AB} 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$e_{AB} = \frac{e_A + e_B}{2} + \frac{\Delta T_{reply}}{4d} (e_B - e_A) \cdot c \quad (7)$$

식 (5)~(7)을 정성적으로 분석해보면, 측정된 거리의 정확도는 T_{round} 와 T_{reply} 등의 값에 무관하고 clock frequency offset 에러가 작을수록, ΔT_{reply} 가 작을수록, 측정거리가 멀수록 Δd 가 작아지기 때문에 측정된 거리의 정확도는 개선된다고 해석될 수 있다. 이와 더불어 측정된 거리가 크면 ΔT_{reply} 의 영향이 감소하는 반면에, 측정된 거리가 작으면 ΔT_{reply} 의 영향이 증가한다는 것을 또한 확인할 수 있다.

한편, 신속모드의 거리측정 방식은 MSG와 ACK 프레임 교환이 2회 수행되는 일반모드와는 달리 노드 A에서 노드 B로 1회만 수행된다. 따라서 측정 시간은 T_{roundA} 와 T_{replyB} 만으로 구성되며 거리 계산식은 일반모드에서의 식 (5)와 같이 계산하지만, 식 (6)의 $T_p(\Delta)$ 는 아래 식 (8)과 같이 계산되어 일반 모드에서의 거리 계산식과는 차별화된다.

$$\begin{aligned} T_p(\Delta) &= \frac{1}{2} (T_{roundA}(1+e_A) - T_{replyB}(1+e_B)) \\ &= \frac{1}{2} (T_{roundA} - T_{replyB}) \left\{ 1 + \left(\frac{e_A + e_B}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

IV. SDS-TWR 거리측정 정확도의 정량적인 성능평가

4.1 실험환경

거리 측정을 위한 실험에 활용된 테스트 네트워크는 콘크리트 건물의 실내에 설치하였고, 실험실 내에서 line-of-sight가 가능한 2개의 센서노드와 한 개의 PC로 구성되며, 측정대상 간의 장애물은 없다. 센서노드들 중 하나는 앵커노드로서 Ranging Master 기능을 수행하며, 다른 하나는 태그노드로서 Ranging Slave의 기능을 수행한다. 앵커노드는 태그노드에 패킷을 전송하여 자신과 태그노드 간의 거리측정을 수행하는 역할을 가진다. 태그노드는 단순히 거리측정 요청이 오면 수동적으로 서비스 절차를 수행하게 된다. 앵커노드에 시리얼케이블을 연결되는 PC는 단순히 앵커노드로부터의 실험결과 로그를 UART 통신을 통해 수집하는 역할을 가진다. 앵커노드와 태그노드 간의 RF 통신을 위한 주파수는 2.4GHz ISM 밴드를 사용하며, 채널과 주파수 대역폭은 각각 0번과 80MHz가 사용되었다. RF 전송 파워는 10dBm으로 설정하였다.

실험을 통해 나노트론사의 상용보드 참조 환경과 비교한 성능평가 결과를 정량적으로 분석하기 위해, 본 연구에서 제시된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택이 탑재된 위버 센서노드 기반의 테스트 네트워크와는 별도로 동일한 실험 환경의 나노트론 개발킷(Nanotron DK)에 포함된 소프트웨어와 보드를 사용한 실험 네트워크를 동일한 실험환경에서 구축하였다. 참조 환경과의 구분을 위해 본 논문에서 구현된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택이 탑재된 네트워크를 위버 거리측정 네트워크(Weaver Distance Measurement Network, WDMN)라고 정의하고, 나노트론사에서 제공된 소프트웨어 기반의 네트워크를 나노트론 거리측정 네트워크(Nanotron Distance Measurement Network, NDMN)라고 정의하였다. 실험을 위해 활용된 노드의 하드웨어와 내장 소프트웨어를 제외하고는 두 네트워크의 실험 환경은 기본적으로 동일하며, 본 논문에서 제시된 기법들의 성능을 분석하여 거리측정의 질적인 측면을 판정하는 데 비교할 참조 대상으로 활용하였다.

위버 노드 기반의 WDMN 환경과 나노트론 노드 기반의 NDMN 환경 각각에 대해 노드 간의 거리와

측정모드 2가지, 즉 일반모드와 신속모드를 변경해가며 실험을 수행하였다. 거리측정에 사용된 거리 대상은 0.5, 1, 2, 3, 4, 5m로서 총 6 지점에서 측정하였다.

상기한 6개의 측정대상 거리와 2가지 측정모드의 조합을 통해 모두 12 종류의 다양한 실험이 수행되었고, 각각의 실험은 WDMN과 NDMN에서 모두 동일한 방법으로 진행되었다. 각 종류의 실험에서 앵커노드는 태그노드에 대해 연속적으로 거리측정 트랜잭션을 요청하고, 총 1000회의 거리측정 트랜잭션을 성공적으로 수행하면 해당 조합의 실험을 종료하고, 다음 조합의 실험을 진행하였다.

4.2 성능평가

본 논문의 실험결과에서 제시하는 측정 거리 값은 소숫점 아래 2자리까지만 측정하였고, 각 조합별 총 1000개의 실측치에 대해 최소값, 최대값, 평균값, 최소오차, 최대오차, 평균오차 등의 다양한 측정치를 제공하여 실제 산업 환경에서 부족한 거리측정의 실증 자료를 제공하고자 시도하였다. 오차는 실측치에서 실제 거리를 뺀 절대값으로 정의하며, 오차율은 평균오차를 실제거리로 나눈 값으로 정의한다.

표 1. 기존 NDMN 환경에서의 일반모드 거리 측정값
Table 1. Measured Data of Normal Mode in the Previous NDMN Environment

Distance (m)	Min. (m)	Max. (m)	Avg. (m)	Min. Error (m)	Max. Error (m)	Avg. Error (m)
0.5	1.01	1.93	1.47	0.51	1.43	0.97014
1	1.09	2.34	1.709	0.09	1.37	0.70826
2	2.33	3.34	2.844	0.33	1.34	0.84434
3	3.53	4.95	4.121	0.53	1.95	1.12059
4	5.06	7.68	5.7346	1.06	3.68	1.73455
5	5.91	8.3	6.568	0.91	3.3	1.56803

표 2. 기존 NDMN 환경에서의 신속모드 거리 측정값
Table 2. Measured Data of Fast Mode in the Previous NDMN Environment

Distance (m)	Min. (m)	Max. (m)	Avg. (m)	Min. Error (m)	Max. Error (m)	Avg. Error (m)
0.5	0.92	2.76	1.832	0.42	2.26	1.33231
1	1.41	2.89	2.119	0.41	1.89	1.11852
2	2.77	3.97	3.363	0.77	1.97	1.3629
3	3.82	5.22	4.453	0.82	2.22	1.45328
4	5.25	11.59	3.2314	1.25	7.59	2.23144
5	6.65	7.96	7.298	.165	2.96	2.29791

표 3. 제안된 WDMN 환경에서의 일반모드 거리 측정값
Table 3. Measured Data of Normal Mode in the Proposed WDMN Environment

Distance (m)	Min. (m)	Max. (m)	Avg. (m)	Min. Error (m)	Max. Error (m)	Avg. Error (m)
0.5	0.32	0.93	0.647	0	0.43	0.15366
1	1.47	1.94	1.719	0.47	0.94	0.71873
2	2	2.55	2.152	0	0.55	0.15243
3	3	3.99	3.527	0	0.99	0.52732
4	1.56	5.53	4.238	0	2.44	0.25103
5	2.38	8.4	5.57	0.32	3.4	0.58225

표 4. 제안된 WDMN 환경에서의 신속모드 거리 측정값
Table 4. Measured Data of Fast Mode in the Proposed WDMN Environment

Distance (m)	Min. (m)	Max. (m)	Avg. (m)	Min. Error (m)	Max. Error (m)	Avg. Error (m)
0.5	0.01	0.93	0.469	0	0.49	0.14389
1	1.16	1.85	1.539	0.16	0.85	0.53922
2	2.01	2.55	2.391	0.01	0.55	0.39075
3	2.34	3.98	3.727	0	0.98	0.72806
4	4	4.98	4.585	0	0.98	0.58476
5	5.06	5.65	5.37	0.06	0.65	0.36985

표 1과 표 2는 기존 NDMN 환경에서의 일반모드와 신속모드의 거리측정 실험결과를 실제 거리에 따라 최소값, 최대값, 평균값, 최소오차, 최대오차, 평균오차를 각각 도표화한 것이다. 한편 표 3과 표 4는 본 논문에서 제안된 WDMN 환경에서의 일반모드와 신속모드의 거리 측정값을 나타낸 도표들이다. 표 1~4를 분석하면, 일반모드와 신속모드 모두 본 연구에서 구현된 WDMN 환경이 기존 NDMN 환경보다 상대적으로 매우 높은 거리측정 정확도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은 WDMN 환경과 NDMN 환경에서 각각 일반모드와 신속모드로 변경해 가며 12 가지의 조합별 실험에 대해 각각 1000개의 실측치에 대한 평균 오차율을 도시하였다. WDMN 환경에서는 전체 평균 오차율이 24.7%로 나타났으며, 구체적으로 일반모드의 경우는 24.3%, 신속모드의 경우는 24.8%로 각각 나타나 일반모드와 신속모드 둘 다 거의 유사한 거리 측정 성능을 확인할 수 있었다. 이에 반해, NDMN 환경에서는 WDMN 환경에 비해 전체 평균 오차율이 84.7%로 급격하게 악화되었는데, 그 원인은 특히 1m 이하의 근거리 측정에 대해 상당히 큰 오차가 발생한

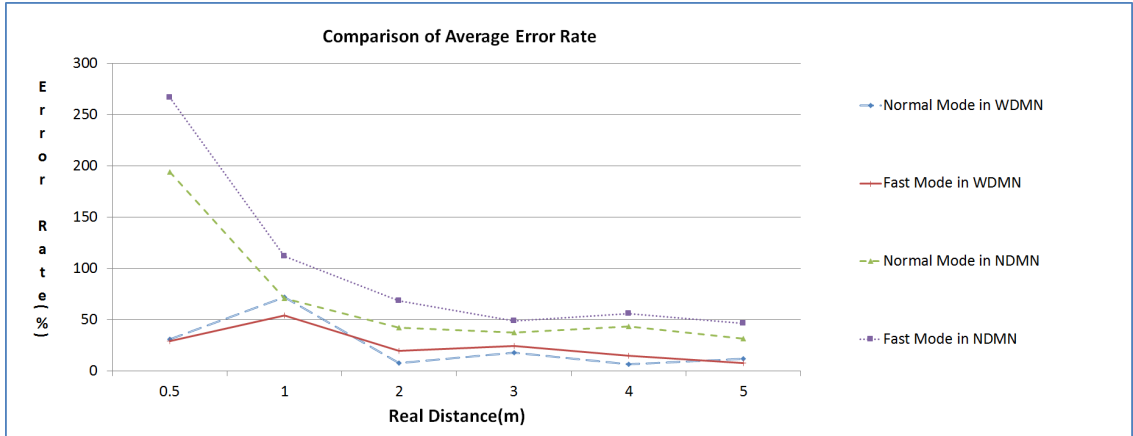


그림 3. WDMN과 NDMN 환경에서의 실측 거리에 따른 오차율 성능 비교
Fig. 3. Performance Comparison of Error Rate w.r.t. Measured Distance in WDMN vs NDMN

것에 기인한 것으로서 나노트론사에서 구현한 SDS-TWR 기법의 한계 오차에 도달한 것이라고 보여진다. 구체적으로 일반모드는 69.9%, 신속모드는 99.8%의 평균오차율을 산출하였는데, 이는 본 논문에서 구현된 WDMN 환경이 나노트론사의 참조 환경과 비교해서 거리측정 정확도 측면에서 성능이 상당히 우수함을 입증하고 있다.

상기한 정량적인 성능평가 결과는 이전 장에서 유도한 거리 계산식을 활용해 정성적으로 해석도 가능하다. 다시 말해, 그림 3에서 측정거리가 멀수록 Δd 가 작아지기 때문에 측정된 거리의 정확도가 실측 거리에 따라 개선됨을 확인할 수 있다. 또한 NDMN 환경의 경우, 실측 거리가 작으면 ΔT_{reply} 의 영향이 증가하기 때문에 거리측정의 절대오차 및 평균오차율이 상당히 악화되는 경향도 그림 3에서 확인 가능하다.

이와 같이 WDMN와 NDMN 환경 모두 아주 가까운 거리에서는 거리측정의 오차가 상대적으로 크다는 공통점을 보이고 있다. 이를 좀 더 정확하게 파악하기

위해, 1m를 기준으로 두 그룹으로 구분지어 그림 4에 도시한 바와 같이 1m 이하와 1m 초과인 경우를 비교해 보았다. 여기서, 1m를 기준으로 삼은 것에 대해서는 특별한 의미를 부여하지 말고, 단순히 NDMN 환경에서 거리측정 대상 6 지점의 평균오차가 모두 1m를 초과하는 한계오차를 보여 주었기 때문에 정한 상대적인 비교 대상이라고 가정한다. WDMN 환경에서는 1m 이하, 즉 0.5m와 1m 거리에 대한 실측치의 평균값만을 고려해 보면, 일반모드는 51.3%, 신속모드는 41.4%로 전체 평균 오차율은 46.4%를 보이고 있다. 이 값은 1m 초과거리에 대한 일반모드와 신속모드의 전체 평균 오차율 13.6%의 약 3.4배에 해당된다. 한편, NDMN 환경에서는 1m 이하의 거리에 대해 일반모드가 132.4%, 신속모드가 189.2%로서 전체 평균 160.8%의 오차율을 보이고 있다. 이 값 또한 1m 초과 거리의 평균 오차율인 46.6%의 약 3.4배가 된다.

한편, 거리측정 정확도에서 WDMN 환경과

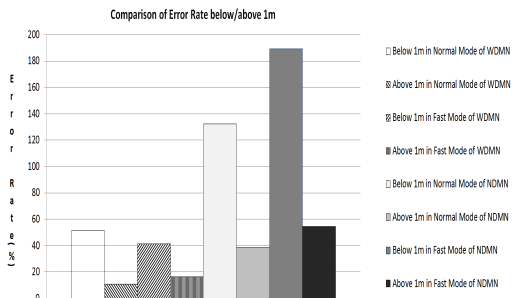


그림 4. WDMN과 NDMN 환경에서의 1m 이하 vs. 1m 초과 오차율 성능 비교
Fig. 4. Performance Comparison of Error Rate Below/Above 1m in WDMN vs NDMN

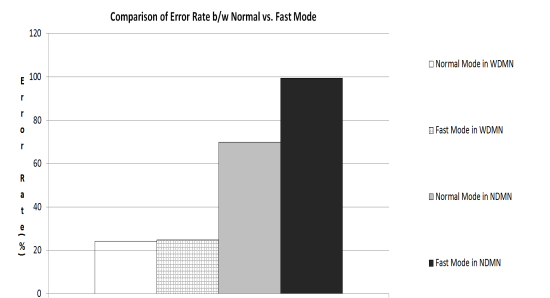


그림 5. WDMN과 NDMN 환경에서의 일반모드와 신속모드의 오차율 성능 비교
Fig. 5. Performance Comparison of Error Rate Between Normal Mode and Fast Mode in WDMN vs NDMN

NDMN 환경의 차이점으로 일반모드와 신속모드 간의 정확도의 차이를 들 수 있다. 일반모드와 신속모드 간의 상대적인 거리측정 정확도 측면에서는 WDMN 환경과 NDMN 환경은 서로 다른 양상을 보이고 있다. 그림 5에 도시한 바와 같이 일반모드와 신속모드 각각의 측정결과에 있어 WDMN 환경에서는 일반모드의 평균 오차율은 24.3%이고 신속모드의 평균 오차율은 24.8%로 그 차이는 겨우 0.5%로서 거의 동일한 거리측정 정확도를 보였다. 반면에, NDMN 환경에서는 일반모드의 평균 오차율은 69.9%이고 신속모드의 평균 오차율은 99.5%로서 29.6%의 상당히 큰 성능 차이를 보여주었다. 그러므로 그림 5를 통해 WDMN 환경에서는 일반모드와 신속모드 사이의 거리측정 정확성이 거의 유사하지만, NDMN 환경에서는 일반모드가 거리측정 정확도 측면에서 신속모드보다 더 우수하다는 점을 확인할 수 있었다.

전체적으로 성능평가 결과를 요약하면, 본 연구에서 제시된 결과물을 사용한 WDMN 환경이 Nanotron DK Board를 사용한 NDMN 환경에 비해 약 60% 정도 더 작은 평균 오차율을 기록하여 상대적으로 매우 우수한 거리측정 정확도를 입증하였다.

V. 결론 및 향후 연구

본 논문은 정밀한 무선측위 기반 CPS를 위한 SDS-TWR 거리측정 기법에 대한 실용적인 성능평가 자료를 산출했다는 점에서 그 기여도를 인정받을 수 있으며, 기존의 무선측위 알고리즘 연구들과는 상호 독립적이며 보완적인 성격을 가진다. 특히 본 연구에서 구현된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택이 탑재된 노드 환경은 나노트론사의 참조 하드웨어 및 소프트웨어 환경보다 평균 약 60% 정도 더 뛰어난 거리측정 정확도를 보여줌으로써 본 연구에서 구현된 위버 노드의 우수성을 입증하고 있다. 본 논문에서 획득한 정성적/정량적 성능평가 결과는 거리측정에 대한 구체적인 실험결과가 빈약한 현재 상황에서 향후 관련 연구의 참조자료로 활용되리라 기대된다. 또한 개발된 IEEE 802.15.4a 소프트웨어 스택은 저전력 센서노드들 간에 정밀한 거리측정 기능을 제공하여 실제적으로 위치 기반 서비스의 실용화에 기여할 수 있으리라 예상된다.

향후 연구방향으로는 먼저 센서노드의 위치가 고정되어 있지 않고 동적으로 빈번하게 변화하는 이동형 측위 시스템에 본 연구 결과를 적용하여 개발된 소프트웨어 스택의 신뢰성 및 강인성을 검증하는 연구가

수행될 계획이다. 이와 더불어 본 논문의 거리측정 실험은 5m 이하를 대상으로 하였으나 그 이상의 장거리에 대해서도 동일한 성능평가를 수행할 수 있다. 나아가 본 실험환경을 활용해 다양한 무선측위 알고리즘들에 대한 실험 환경 성능평가를 수행하고 보다 개선된 측위 알고리즘을 제시할 수도 있다.

References

- [1] H. University, *Development of real-time location service based on CSS*, Korea Communications Agency Project Final Report, 2009.
- [2] Nanotron Technologies GmbH, *Real time location systems (RTLS)*, White Paper, 2006.
- [3] C. Rohrig, C. Kirsch, J. Lategahn, M. Muller, and L. Telle, "Localization of autonomous mobile robots in a cellular transport system," *Engineering Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 148-158, 2012.
- [4] J. Spletzer, A. K. Das, R. Fierro, C. J. Taylor, V. Kumar, and J. P. Ostrwski, "Cooperative localization and control for multi-robot manipulation," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, vol. 2, pp. 631-636, Maui, HI, 2001.
- [5] N. Marien and Y. Brabants, "Movement tracking using wireless sensor networks," B.E. Thesis, Oulu University, Finland, 2011.
- [6] J. Y. Lee and J. G. Kim, "Ranging the distance between wireless sensor nodes using the deviation correction method of received signal strength," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, vol. 7, no. 2, pp. 71-78, 2012.
- [7] J. W. Song, S. J. Hur, Y. W. Park, and K. Y. Yoo, "Database investigation algorithm for high-accuracy based indoor positioning," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, vol. 7, no. 2, pp. 85-93, 2012.
- [8] K. Y. Lee, "A study on accuracy enhancement of indoor local positioning system based on Zigbee," *J. Korean Inst. Inf. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 85-91, 2010.
- [9] IEEE Standard 802.15.4a, Draft 3, 2006.
- [10] Nanotron Chirp Spread Spectrum Proposal,

IEEE P802.15 WG for WPANs, 2005.

- [11] J. H. Yoo and H. C. Kim, "Implementation of IEEE 802.15.4a software stack for ranging accuracy based on SDS-TWR," *J. Korea Ind. Inf. Syst.*, vol. 18, no. 6, pp. 17-24, 2013.
- [12] S. K. Kwon, H. C. Lee, and D. M. Lee, "Performance comparison of CSS-based TWR and SDS-TWR mechanism for precise location recognition," in *Proc. KICS*, pp. 2115-2116, 2009.
- [13] L. Wei, Z. Jian, W. Chunzhi, and X. Hui, "Kalman filter localization algorithm based on SDS-TWR Ranging," *Tekomnika Indonesian J. Electrical Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 1436-1448, 2013.
- [14] Y. S. Nam, B. J. Kang, J. D. Huh, and K. R. Park, "Wirelessly synchronized one-way ranging algorithm with active mobile nodes," *ETRI J.*, vol. 31, no. 4, pp. 466-468, 2009.
- [15] Y. Jiang and V. C. M. Leung, "An asymmetric double sided two-way ranging for crystal offset," in *Proc. Int. Symp. Signals, Systems Electron.*, pp. 525-528, 2007.
- [16] J. S. Kim, J. U. Yang, and S. H. Yang, "A study on the location awareness system using TOA of CSS algorithm," *J. Korean Inst. Intell. Transport Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 13-25, 2008.
- [17] M. K. Jung and D. M. Lee, "Performance analysis of the localization compensation algorithm for moving objects using the least-squares method," *J. KICS*, vol. 39c, no. 1, pp. 9-16, 2014.
- [18] S. J. Hur, J. H. Kim, and Y. W. Park, "A study of selective indoor positioning between enhanced time difference of arrival and pattern matching using RSSI," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 51-59, 2013.

유 준 혁 (Joonhyuk Yoo)



1993년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 학사
1995년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사
2007년 12월 : 매릴랜드대학교,
컴퓨터공학과 박사
현재 : 대구대학교 정보통신대학
정보통신공학부 교수

<관심분야> 임베디드 소프트웨어, 컴퓨터구조, 사이버-물리 시스템

김 희 철 (Hiecheol Kim)



1983년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 학사
1990년 8월 : 남가주대학교 컴
퓨터공학과 석사
1996년 8월 : 남가주대학교 컴
퓨터공학과 박사
현재 : 대구대학교 정보통신대
학 정보통신공학부 교수

<관심분야> 임베디드 운영체제, 무선센서네트워크