광신호 기반의 마이크로 센서 노드 위치 인식 시스템을 위한 파라미터 식별

The Parameter Identification for Localization Scheme of the Optics-Based Micro Sensor Node

전 지 훈, 이 민 수, 박 찬 국*
(Ji-Hun Jeon¹, Min-Su Lee¹, and Chan-Gook Park¹)
¹Seoul National University

Abstract: In this paper, the parameter identification for localization scheme for the optics-based micro sensor node is conducted. We analyzed short measurement range problem which can be occurred in optical based micro sensor node localization method using a time of flight. And we set up the theory for distance and maximum reflected laser power to overcome the problem by identifying hardware parameters like laser power, effective area of MEMS CCR, sensitivity of photodetector, and so on. Experimental results of measurement of maximum reflected laser power were compared with results of the theory. By using the theory, we can identify hardware parameters of localization scheme to measure particular position of the optics-based micro sensor node.

Keywords: optical wireless sensor network, sensor node localization, ToF, MEMS CCR

I. 서론

인적 자원의 감소와 극한 상황에 대비하기 위해 저가의 무인화 감시 장비에 대한 관심이 집중되고 있다. 무인 감시 장비 관련 기술 중 하나인 센서 네트워크(sensor network)는 특정 지역이나 공간 상에 다수의 센서 노드를 배치하여 주변의 정보를 수집하고 가공하는 기술을 말한다. 센서 노드가 수집한 정보를 실제로 활용하기 위해서는 센서 노드가 어디에 배치되었는지에 대한 위치 인식이 선행되어야 하는데, 기존의 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)에서는 RF(Radio Frequency)의 특성을 활용하여 센서 노드의 위치를 인식하는 연구가 진행되어 왔다[1].

하지만 RF 기반의 센서 네트워크는 RF 신호를 사용함으로써 센서 노드의 전력 소비가 큰 문제와 신호 교란 및 보안에 취약한 문제를 가지고 있다. 이런 RF 센서 네트워크의 단점을 극복하기 위해 광 신호 기반의 센서 네트워크가 대안으로 등장했다. 지향성이 뛰어난 광 신호는 외부 신호 교란과 외부의 감청에 강건한 특성을 가지고 있으며 특수 반사체를 사용하여 통신할 경우 RF 신호를 이용할 때 보다 전력 소모를 절감할 수 있다. 그리하여 광 신호를 입사 방향과 평행한 방향으로 반사시키는 특수 반사체인 CCR(Corner Cube Retro-reflector)을 이용한 광 신호 기반의 센서 네트워크에 대해 연구가 진행되었고, 이러한 광 신호 기반의 무선 센서 네트워크의 사례로는 미 국방성의 무선 광 통신에 관한 Smart Dust 프로젝트가 있다[2].

하지만 선행연구에서는 센서 노드의 제작과 데이터 수집에 관한 연구만 이루어졌을 뿐 센서 노드의 위치 인식에 관한 연구는 수행되지 않았고, 최근에 들어서야 광신호의 출발 신호와 상용 CCR에 반사되어 돌아온 도착 신호의 시간 차이인 TOF(Time Of Flight) 정보와 스캐닝 기법으로 구한 AOA(Angle Of Arrival) 정보를 이용하여 2차원적으로 센서 노드의 위치를 인식하는 시스템이 소개 되었다[3]. 하지만 실제 마이크로 센서 노드의 반사체로 쓰일 초소형 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) CCR은 선행 연구의 반사체로 사용된 상용 CCR보다 크기가 작고 반사 성능이 좋지 않기 때문에 TOF 기법을 MEMS CCR에 그대로 사용할 시 반사된 광 신호의 세기가 미약하여 위치 인식이 가능한 거리가 감소하게 된다. TOF를 이용한 위치 인식 시스템의 구조를 변경하지 않고 위치 인식이 가능한 거리를 증가시키기 위해서는 시스템을 이루고 있는 장비들이나 MEMS CCR의 하드웨어적 파라미터를 향상시키는 것이 가장 효과적이다. 하지만 하드웨어적 파라미터를 어느 정도로 향상시켜야 원하는 위치가 인식이 가능할지에 대한 기준은 제시된 바 없다.

본 논문에서는 MEMS CCR을 반사체로 사용한 센서 노드에 TOF를 이용한 위치 인식 기법을 적용했을 때 거리에 따라 반사되는 광 신호의 세기를 분석하였다. 그 후 분석한 내용을 바탕으로 반사 광 신호의 세기에 대한 관계식을 세우고 이를 실제 실험을 통해 확인하였다. 그 후 특정 거리 이상의 위치 인식을 위해 필요한 TOF기법 위치 인식 시스템과 MEMS CCR의 하드웨어적 파라미터를 구하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 TOF 위치 인식 기법에 대한 소개와 MEMS CCR을 사용할 시 발생하는 문제점에 대한 분석한다. III 장에서는 반사 광 신호의 세기를 이론적으로 구해본다. IV 장에서는 실험 결과와 비교하며 V 장에서는 결론을 맺는다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 3., 수정: 2012. 12. 26., 채택확정: 2012. 12. 31.

전지훈, 이민수, 박찬국: 서울대학교 기계항공공학부

(jh5004@snu.ac.kr/mandu46@snu.ac.kr/chanpark@snu.ac.kr)

※ 본 논문은 방위 사업청 지정 국방MEMS특화연구센터에서 지원하여 연구되었음(과제번호: UD090024FD).

II. TOF를 이용한 센서 노드 위치 인식

1. TOF 기법의 원리

TOF를 이용한 센서 노드 위치 검출 시스템의 구조는 그림 1과 같이 크게 광 신호 펄스를 발생시키는 레이저 모듈, 광 분리기, 베이스 스테이션을 회전시키는 로테이션 스테이지, 펄스의 출발 신호와 도착 신호를 검출하는 두 개의 광 검출기(photo detector) 그리고 두 펄스의 시간차를 계산하기 위한 TDC (Time to Digital Converter) 모듈로 구성되어 있으며, PC를 이용하여 시스템을 제어하는 구조로 되어있다[3].

TOF를 이용한 센서 노드 위치 인식 기법은 빛의 속도가 일정하다는 점에 기초한다. 베이스 스테이션이 회전을 하며 광 신호를 보내면 출발 시간과 센서 노드의 반사체에 반사되어 돌아온 광 신호의 도착 시간 사이의 차이를 측정하여 센서 노드와 떨어진 거리를 계산하고, 이 때의 각도 정보를 이용하여 2차원 적으로 센서 노드의 위치를 인식하게 된다. 이 기법에 사용되는 센서 노드의 반사체는 CCR로 세 면이 서로 수직을 이루고 있어서 CCR에 입사하는 광신호의 입사 방향에 평행한 방향으로 빛을 반사하는 특성을 가지고 있다.

광 신호의 흐름을 따라 자세히 설명하면 다음과 같다. 그림 2의 레이저 모듈에서 발사된 광 신호는 광 분리기를 거쳐 두 개의 광 신호로 나누게 된다. 광 분리기의 특성에 의하여 한 개의 광 신호는 센서 노드가 있는 정면 방향으로 나아가

그림 1. TOF 위치 인식 기법 개념도.

Fig. 1. Conceptual design of TOF localization scheme.

그림 2. 구현된 베이스 스테이션.

Fig. 2. Realization of Base station.

고 다른 광 신호는 90도로 방향을 꺾어 광 검출기 1로 향한다. 광 검출기 1은 보내진 광 신호를 검출하여 TDC 모듈로 일정한 전압 출력을 내보내고 이를 통해 광신호의 출발 시간이 측정된다. 광 분리를 떠나 센서 노드를 향해 진행된 광 신호는 센서 노드의 반사체인 CCR에 의해 반사되어 입사 방향의 반대 방향으로 되돌아가고 다시 광 분리기를 거치게 된다. 다시 나누어진 광 신호 중 90도로 꺾인 광 신호는 광 검출기 2에 도착하여 검출이 되고 TDC 모듈에 도착 시간이 측정된다. 이 때의 측정된 시간 차이는 광 분리기와 센서 노드의 반사체 사이의 거리를 광 신호가 왕복하는데 걸린 시간 이므로 광속도를 곱하고 반으로 나눠 거리를 구하게 된다. 베이스 스테이션이 위치한 로테이션 스테이지는 일정 속도로 회전하다가 센서 노드와 떨어진 거리가 TDC를 통해 측정되는 순간의 각도 정보를 기록한다. 이렇게 얻어진 각도 정보와 거리 정보를 융합하여 2차원 적으로 센서 노드의 위치를 검출하게 된다.

2. MEMS CCR의 사용

마이크로 센서 노드의 반사체는 기존 실험에 쓰인 그림 3의 상용 CCR이 아닌 그림 4의 형태를 갖고 있는 마이크로 미터 크기의 초소형 반사체 MEMS CCR이므로 이에 따라 생기는 문제점들이 존재한다.

위에서 설명했듯이 반사 광 신호가 광 검출기 2에 도달하여 검출이 되어야만 TDC 모듈을 통해 광 신호 도착 시간이 측정되어 센서 노드의 위치를 인식할 수 있게 되는데, 광 검출기는 민감도에 따라 일정 이상의 세기를 가진 광 신호만을 인식할 수 있다. 이 때문에 광 검출기에 도달하는 반사 광신호의 세기가 최소 검출 가능 세기보다 강해야 하는데, 실험에 쓰이는 MEMS CCR의 면적은 표 1에서 볼 수 있듯이 상용 CCR의 약 1/1000배 수준이므로 반사되어 돌아오는 광 신호의 세기 또한 상용 CCR을 사용할 때 보다 훨씬 감소하게 되어 광 검출기에서 검출하기가 어렵게 된다. 또 다른 문제점으로는 MEMS CCR의 표면이 균일하지 않아 여기에 반

그림 3. 상용 CCR의 모습.

Fig. 3. Image of Commercial CCR.

그림 4. MEMS CCR의 모습.

Fig. 4. Image of MEMS CCR.

표 1. 상용 CCR과 MEMS CCR의 면적.

Table 1. Area of Commercial CCR and MEMS CCR.

	상용 CCR	MEMS CCR
한 면의 면적	약 100 mm ²	약 0.09 mm ²

그림 5. Collimator 구성.

Fig. 5. Configuration of collimator.

사된 광신호의 경우 입사한 광 신호에 비해 훨씬 큰 퍼짐 각을 갖게 되는데, 이 때문에 센서 노드와의 거리가 증가할수록 광 신호가 퍼지게 되어 광 밀도가 감소하므로 일정한 면적을 가진 광 검출기의 수신 부에 들어가는 광 신호의 세기는 감소하게 된다. 이러한 이유들로 반사 광 신호가 광 검출기의 최소 광 신호 세기를 만족하지 못해 상용 CCR을 사용할 때 보다 위치 인식 거리가 훨씬 줄어들게 된다.

위의 언급한 원인들로 인해 MEMS CCR을 반사체로 사용하여 TOF 위치 인식 기법을 실험하였을 때 얻을 수 있었던 최대 인식 가능 거리는 약 26cm 였다. 인식 가능 거리가 짧은 점을 해결하기 위한 방안으로는 MEMS CCR을 교체하는 것 외에, 반사 광 신호의 퍼짐 각으로 인해 광 신호의 일부만이 광 검출기의 수신 부에 들어가던 문제를 시스템에 렌즈를 추가 설치하는 것을 고려하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 렌즈를 통해 퍼진 광 신호를 모아 평행 광으로 만들고 이를 다시 광 검출기의 수신 부로 모으는 collimator를 구성하여 TOF 위치 인식 시스템에 적용하였다[4]. 이를 통해 퍼진 반사 광 신호가 한 점으로 모인 후 광 검출기에 도달하게 되어 최대 측정 거리가 약 10 cm 증가한 총 36 cm가 되었다. 이를 통해 위치 인식 가능 거리가 증가하였지만, 실제 광 신호 기반의 센서 네트워크를 구성하기엔 여전히 위치 인식 가능 거리가 부족하였다.

III. 거리에 따른 반사 광 신호 세기 분석

MEMS CCR을 이용한 센서 노드 위치 인식 기법은 위에서 기술한 것과 같이 반사 광 신호의 세기가 작은 문제점으로 인해 광 검출기에서 위치 인식이 가능한 거리가 매우 짧다. Collimator를 설치한 현재의 시스템은 TOF 기법이 아닌 다른 기법으로 변경하지 않는 한 구조 면에서 더 이상 개선할 여지가 없다고 판단되었기에, 위치 인식 가능 거리를 향상시키

기 위해 시스템을 이루고 있는 레이저의 출력이나 광 검출기의 민감도를 올리는 등 하드웨어적으로 시스템을 향상시키거나 MEMS CCR을 수정하는 방안을 선택하였다. 하지만 현재의 위치 인식 가능 거리를 증가시키려 할 때 어느 정도의 하드웨어적 파라미터가 필요한지에 대한 기준점이 존재하지 않기에 하드웨어 수정에 대한 계획을 세우거나 효율적으로 하드웨어를 수정하기가 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 반사 광 신호의 세기에 영향을 주는 요인들을 분석하고 이론적 모델을 만든 후 실험을 통하여 확인 하였다.

1. 입사 광 신호의 광 밀도

베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 멀어질 수록 입사 광 신호의 퍼짐에 의해 센서 노드의 MEMS CCR에 도달할 때의 광 신호 면적이 증가하므로, 입사 광 신호의 퍼짐 각과 센서 노드 사이의 거리는 반사 광 신호의 세기에 영향을 끼치게 된다. 따라서 반사 광 신호의 세기를 계산하기 위해 입사 광 신호 면적에 대한 분석이 수행되어야 한다. 레이저 모듈에서 출발한 입사 광 신호는 퍼짐 각에 의해 그림 6의 붉은 색과 같이 면적을 가진 상태로 MEMS CCR에 도달하게 된다. MEMS CCR은 세 면이 서로 수직을 이루는 구조로 광 신호의 입사 방향의 반대 방향으로 광 신호를 반사하고 광 신호는 MEMS CCR 표면의 불균일성 때문에 그림 6의 녹색과 같이 입사 때보다 면적이 더 넓어진 형태로 반사된다. 광 분리를 거친 광 신호는 II 장에서 언급한 collimator를 통해 한 점으로 모여 최종적으로 광 검출기의 수신 부에 도달하게 된다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 레이저 모듈에서 나온 입사 광 신호의 초기 반지름을 r , 퍼짐 각을 θ_i 라고 하면 거리 d 만큼 떨어져 있는 MEMS CCR에 도달하는 광 신호의 면적은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_d = \pi(r + d \tan \theta_i)^2 \quad (1)$$

이 면적으로 레이저 모듈에서 나온 입사 광 신호의 세기 P_i 를 나누면 식 (2)와 같이 MEMS CCR에 도달했을 때의 광 밀도를 구할 수 있다.

그림 6. 거리에 따른 광 신호의 면적.

Fig. 6. Area of optical signal according to sensor node distance.

그림 7. 입사 광 신호의 퍼짐 각과 면적.

Fig. 7. Spread angle and area of incident optical signal.

$$I_i = \frac{P_i}{\pi(r + d \tan \theta_i)^2} \quad (2)$$

광 밀도의 단위는 W/m^2 으로 광 밀도에 MEMS CCR이 반사하는 면적인 유효 반사 면적에 곱하면 실제 반사되는 광 신호의 세기를 구할 수 있게 된다.

이 외에 반사 광 신호가 광 검출기로 돌아오는 과정에서 반사 광 신호의 퍼짐 때문에 광 신호의 손실이 존재할 수 있지만 II 장에서 소개한 선행 연구의 collimator를 수신 부에 설치하여 반사 광 신호를 렌즈를 통해 광 검출기의 한 점으로 모아왔으므로 이런 손실을 고려하지 않았다. 이를 고려하면 입사 과정에서도 렌즈를 설치하여 퍼짐 각에 의한 손실을 줄일 수 있다. 실제 따로 행한 실험에서도 MEMS CCR 앞에 렌즈를 설치할 시 좋은 결과가 나왔지만 이는 센서 노드를 제작할 때 고려해야 할 사항이므로 이에 대한 연구는 추후 진행하려고 한다.

2. 유효 반사 면적

MEMS CCR에 입사하는 광 신호의 방향이 그림 8과 같이 $-\hat{n}_i$ 벡터 방향이라 할 경우, 반사되는 방향은 $\hat{n}_i$ 벡터 방향이고 이 입사 벡터 값에 따라 MEMS CCR의 유효 반사 면적이 달라지게 된다[5,6]. 퍼진 입사 광 신호의 면적은 MEMS CCR 보다 훨씬 크므로, MEMS CCR이 퍼진 광 신호를 벗어나지 않는다는 가정 하에 유효 반사 면적은 입사 광 신호의 벡터를 법선 벡터로 하는 평면에 MEMS CCR을 정사영으로 내린 넓이와 같다. 이는 입사 광 신호의 방향 벡터 크기를 1로 가지는 단위 벡터로 나타낸 후 이 벡터의 x, y, z 성분을 더한 것에 MEMS CCR의 한 면의 넓이를 곱한 것으로 나타낼 수 있다[7].

정사영의 넓이 또는 벡터 성분의 합을 생각해 본다면 가장 큰 유효 반사 면적을 갖는 입사 광 신호의 방향 벡터는 $(1, 1, 1)/\sqrt{3}$ 로, 그림 9를 보면 방향 벡터를 법선 벡터로 하는 평면에 MEMS CCR을 정사영으로 내린 모습과 정사영의 넓이를 알 수 있다. 이를 통해 MEMS CCR의 한 면의 넓이가 A, 총 넓이가 3A일 때 최대 유효 반사 면적은 $A\sqrt{3}$ 임을 알 수 있다.

하지만 실험에서의 MEMS CCR은 2차원적인 스캐닝을 위해 기울여지지 않고 똑바로 놓여져 있으므로 입사 광 신호의 방향 벡터는 3차원 x, y, z가 아닌 2차원 x, y만이 가능하다. 이

그림 8. 입사한 광 신호의 반사.

Fig. 8. Reflection of incident optical signal on MEMS CCR.

그림 9. MEMS CCR의 최대 유효 반사 면적.

Fig. 9. Maximum effective area of MEMS CCR.

그림 10. 실험 환경에서의 최대 유효 반사 면적.

Fig. 10. Maximum effective area of experimental setup.

를 고려한다면 최대 유효 반사 면적을 갖는 입사 광 신호의 방향 벡터는 그림 10에서 볼 수 있듯이 $(-1, -1)/\sqrt{2}$ 이 되고 실험에서 얻어지는 최대 유효 반사 면적은 $A\sqrt{2}$ 가 된다.

3. 반사율과 이상계수, 광 분리기

정확한 반사 광 신호 세기를 계산하기 위해선 MEMS CCR에서 광 신호가 반사될 때 MEMS CCR의 반사율 또한 고려해야 한다. MEMS CCR 제작 환경에서의 얻어진 반사율은 약 0.8 이지만[8] 반사 광 신호 세기를 측정하는 실험에서 대기 환경과 먼지에 의한 반사율 감소, MEMS CCR의 개체에 따른 오차와 세 면의 비 정렬 오차 등을 고려하여 이상 계수(ideal factor) a 를 도입한다. MEMS CCR의 한 면의 반사율을 $0.8a$ 로 놓고 반사 횟수를 고려해보면 최대 유효 반사 면적을 구할 때와 같이 MEMS CCR이 2차원 적으로 놓여있으므로 반사면은 세 면이 아니라 두 면이 된다. 결국 실험 환경에서의 MEMS CCR의 반사율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{CCR} = 0.64a^2 \quad (3)$$

만약 MEMS CCR에 입사하는 광 신호의 방향이 그림 9와 같이 3차원이라면 반사면은 세 면이 되므로 반사율은 $0.8a$ 의 세제곱인 $0.512a^3$ 이 되었을 것이다. 2차원인지 3차원인지에 따라 유효 반사 면적과 반사율의 식이 달라지므로 이를 각기 표시하지 않고 하나의 인자로 표시하도록 한다. 실험환경인 2차원 상의 최대 유효 반사 면적과 반사면에 의한 반사율을 곱한 식을 R_{CCR} 이라 정의하였다.

$$R_{CCR} = 0.64a^2 \cdot A\sqrt{2} \quad (4)$$

이외에 고려해야 할 점은 레이저 모듈 바로 다음에 있는 광 분리기로, 레이저 모듈에서 바로 나온 입사 광 신호의 세기가 P_i 일지라도 광 분리에 의해 절반으로 감소하게 된다. 실제 광 분리를 통과하는 광 신호의 세기를 측정해 본 결과, 광 분리를 통과하는 통과율은 약 0.5, 광 분리에 의해 90도로 반사되는 반사율은 약 0.4, 광 분리를 거치며 손실되는 손실율은 약 0.1임을 알 수 있었다. 처음 광 신호를 MEMS CCR로 입사할 때는 광 분리를 통과하여 50%가 감소하고 MEMS CCR에 의해 반사된 후 광 분리에서 다시 90도로 반사되므로 60%가 감소한다. 이를 통해 광 분리기로 인해 처음 광 신호의 1/5로 세기가 감소됨을 알 수 있다.

4. 최대 반사 광 신호 세기

위에서 구한 반사 광 신호에 영향을 주는 여러 요소들을 고려하여 식들을 종합해 현재 시스템의 최대 반사 광 신호 세기 이론 식을 구해보면 다음 식 (5)와 같다

$$P_{re} = \frac{P_i \cdot R_{CCR}}{5\pi(r + d \tan \theta_i)^2} \quad (5)$$

식 (5)의 각 파라미터에 실제 수치를 대입하고 이를 통해 거리와 세기에 관한 예상 그래프를 그려 실제 반사 광 신호 세기와 비교하여 본다.

IV. 실험 및 결과 분석

1. 이론 식과 측정치의 비교

위에서 구한 거리에 따른 반사 광 신호 세기에 대한 이론 식을 검증하기 위해 그림 6과 같은 시스템 구조에서 검출기 대신 파워 미터를 설치하고 거리가 늘어남에 따라 최대 반사 광 신호 세기가 어떻게 되는지를 반복 실험하여 측정한 후 평균을 구하였다. 이 때의 베이스 스테이션 설정을 표 2에 정리하였다. 그 후 위의 이론 식에서 수치를 알 수 없는 이상 계수를 구하기 위해 실제 측정된 값과 비교하여 이상 계수를 구하였다. 이상 계수가 약 0.9일 때 그림 11(a)와 같이 이론 식의 광 신호 세기 예상 그래프와 실제 측정된 세기가 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 실험을 통해 구한 이상 계수를 다시 확인하면서 거리에 따라 감소하는 반비례 그래프를 뚜렷이 나타내고자 렌즈 하나를 광 분리기 다음에 설치하여 일부러 입사 광 신호의 퍼짐 각을 크게 하였다. 그림 11(a)에서는 실험 환경의 거리 한계로 인해 볼 수 없었던 세기와 거리의 반비례 관계의 모습을 렌즈를 통해 퍼짐 각을 15 mrad로 증가시키자 그림 11(b)에서는 짧은 거리에서도 반비례 관계의 모습을 뚜렷이 볼 수 있었고 다른 파라미터의 값을 가진 실험을 통해 위에서 적용된 이상 계수가 실제 값에 근접한다는 것을 확인할 수 있었다.

표 2. 베이스 스테이션의 설정.

Table 2. Base station setting.

광 신호		MEMS CCR	
출력	130 mW	한 번 길이	300 μ m
초기 반지름	1 mm	반사율	0.8a
퍼짐각	0.5 mrad	이상 계수(a)	0.9

(a) Angle of beam spread: 0.5 mrad.

(b) Angle of beam spread: 15 mrad.

그림 11. 반사 광 신호 측정 값과 이론 값의 비교.

Fig. 11. Comparison of reflected laser power and theory.

2. 이론 식을 통한 파라미터 식별

시스템에서 사용하는 광 검출기의 최소 검출 세기를 알고 위에서 구한 이론 식을 이용한다면 최소 검출 가능 세기를 최대 반사 광 신호 세기 값에 대입한 후 역산하여 위치 인식이 가능한 최대 측정 거리를 구할 수 있다. 현재 위치 인식 시스템에서 사용하는 광 검출기의 최소 검출 가능 세기는 약 0.35 mW이고 현재의 하드웨어를 그대로 사용한다면 약 40 cm 정도 까지 위치 측정이 가능함을 구할 수 있다. 이는 TOF 기법의 설명에서 말한 위치 인식 가능 거리와 일치함을 확인할 수 있다. 위에서 언급한 여러 하드웨어적 수치를 향상 시킨다면 더 먼 거리까지 측정이 가능하다. 예를 들어 같은 시스템을 사용하면서 광 검출기만 APD(Avalanche Photo Detector)라는 최소 검출 가능 세기가 0.57 μ W 인 광 검출기로 교체한다면 위치 인식 가능 거리가 약 58 m까지 증가하게 된다.

본 논문을 통해 광 신호 기반의 마이크로 센서 노드를 이용한 위치 인식에서 특정 거리의 위치 인식을 위해 필요한 하드웨어의 파라미터를 미리 구하여 계산하거나 파라미터 값을 조절할 때 얼마나 측정 거리가 향상될 수 있는지를 구할 수 있다. 약 100 m까지 위치 인식이 가능하도록 시스템을 세팅하고 싶다면, 광 검출기를 위에서 언급한 APD로 교체한

후 레이저의 출력을 약 250 mW로 증가시키면 된다는 것을 알 수 있다. 실제 센서 네트워크를 구성할 때의 환경에는 실험실의 환경엔 존재하지 않는 기상 환경의 변화나 장애물 등의 변수가 존재하므로 위의 식을 이용하여 구한 파라미터 보다 더 향상된 수치를 필요로 하겠지만 이론 식을 통해 적어도 최소한의 파라미터 기준을 제시할 수 있게 된다.

V. 결론

본 논문에서는 먼저 광 신호 기반의 센서 네트워크의 센서 노드 위치 인식 기법 중 기존에 연구한 TOF를 이용한 위치 인식 기법에 대해 설명하였다. 상용 CCR 대신 MEMS CCR을 사용할 시 반사되는 광신호의 세기 부족으로 인해 센서 노드 위치 인식 거리가 줄어들게 됨을 확인하였다. 이를 해결하고자 현 시스템에 의한 반사 광 신호 세기에 대해 광 밀도, 유효 반사 면적, 반사율 등을 분석한 후 이론 식을 세웠고 실험을 통해 이론 식을 검증하였다. 마지막으로 이론 식을 통해 위치 인식이 가능한 최대 거리를 계산하거나 거꾸로 특정 위치의 인식을 위해 필요한 파라미터를 구할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] B. Kim, M. Shim, and J. Lee, "Ubiquitous sensor network localization technologies and trends," *Weekly Technical Trends of National IT Promotion Agency (in Korean)*, no. 1291, pp. 27-36, 2007.
- [2] M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "Emerging challenges: mobile networking for SmartDust," *Journal of Communications and Networks*, vol. 2, pp. 188-196, 2000.
- [3] J. Kim, "Localization methods of sensor node in wireless optical sensor network," Master degree thesis, Seoul National University (in Korean), 2011.
- [4] W. Jang, "Optics-Based wireless sensor node localization using MEMS CCR," Master degree thesis, Seoul National University (in Korean), 2012.
- [5] X. Zhu, V. S. Hsu, and J. M. Kahn, "Optical modeling of MEMS corner cube retroreflectors with misalignment and nonflatness," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 26-32, 2002.
- [6] L. Zhou, J. M. Kahn, and K. S. J. Pister, "Corner-cube retroreflectors based on structure assisted assembly for free-space optical communication," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 233-242, 2003.
- [7] V. S. Hsu, J. M. Kahn, and K. S. J. Pister, "MEMS corner cube retroreflectors for free-space optical communications," Masters dissertation, EECS Dept., Univ. California, Berkeley, Berkeley, CA, Oct. 1999.
- [8] D. Kim, H. Kim, J. Park, and C. Park, "MRCND micro sensor application system laboratory stage 2 final report," MRCND (in Korean), 2011.

전 지 훈

2011년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2011년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 관성항법시스템, 센서 네트워크.

이 민 수

2008년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2008년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 관성항법시스템 및 보행자 항법 시스템 개발.

박 찬 국

1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술 연구센터 Post Doc. 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수.

1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원. 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수. 2009년 미국 Georgia Tec. 방문교수, 연구 관심분야는 INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링 기법, FDIR 시스템.