Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2013) 19(3):268-274
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.11.1691 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

# 광신호 기반 무선 센서 노드 위치 인식을 위한 ToF 기법의 성능 분석

# Performance Analysis of Scanning Scheme Using ToF for the Localization of Optics-Based Sensor Node

장 우 협, 박 찬 국*
(Woo Hyeop Jang[1] and Chan Gook Park[1])
[1]Seoul National University

**Abstract:** In this paper, the performance analysis of optics-based sensor node localization using ToF (Time of Flight) scheme is conducted. Generally, the position of the sensor node is calculated on the base station. And the base station scans neighboring sensor nodes with a laser. The laser which is reflected from one sensor node, however, can be reached to the base station at different angles according to the scanning resolution. This means that the error of the reached angle can increase and one node may be recognized as different nodes. Also the power of laser can decrease because the laser signal spread. Thus the sensor node which is located at a long distance from the base station cannot be detected. In order to overcome these problems which can be occurred in localization using ToF, the beam spot, the scanning resolution, the size of reflector and the power of laser at the sensor node were analyzed. It can be expected that the consequence of analysis can be provided in acquisition of accurate position of sensor node and construction of optics-based sensor node localization system.

**Keywords:** optical wireless sensor network, ToF, MEMS CCR

## I. 서론

각종 범죄와 적의 침입에 대한 사회 경제적 불안 요인으로 인해 범죄를 미리 예방하고 적의 이상 움직임을 미리 감지하기 위한 능력들이 요구되어지고 있다. 특히 휴전선을 경계로 남북한이 서로 대치하고 있는 우리나라의 경우 적군 침투의 조기 발견은 아군의 인명보호와 국가적 재난을 예방하는데 필수적이다. 최근 빈번하게 발생하는 북한의 도발을 사전에 차단하기 위해 많은 인력과 장비들을 투입하고 있으나 재래적인 방법으로는 군 인력과 시간 및 비용만을 소비할 뿐 괄목할 만한 성과를 거두지 못하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 적의 이상 움직임에 대해 즉각적으로 대처하고 효율적인 경계 병력의 운용을 위한 무인 감시 시스템에 대한 연구들이 수행되고 있다[1].

무인 감시 시스템은 자동화된 원격 정보 수집의 목적을 가지고 있으므로 특정 지역에 적외선, 압력, 진동 센서 등이 포함된 소형의 센서 노드(micro sensor node)를 배치하여 주변의 물리적 정보를 획득하는 RF 기반의 무선 마이크로 센서 네트워크(wireless micro sensor network)를 중심으로 개발되고 있다. 기존의 선행 연구 사례를 보면 미국, 유럽, 일본을 중심으로 다양한 사업이 진행 중이며 일부 실용화 단계에 접근한 시스템들이 구축되어 있다. 미국의 경우 Sandia Lab.의 MIDS (Mini Intrusion Detection System), 미 해군에서 운용중인 TRSS (Tactical Remote Sensor System), Lockheed Martin사의 SCOUT (Surveillance Collection Observation Unit) 있으며 민간의 경우 UC Berkeley, UCLA, MIT 등의 대학에서 하드웨어 시스템을 개발하고 있는 실정이다. 일본의 경우 와세다 대학, NPO 법인 WIN, 아즈사의 공동 연구를 통해 Ni3 센서 노드를 개발한 바 있다[2-5].

이러한 센서 네트워크는 RF 신호 기반의 능동 센서 노드를 사용하기 때문에 배터리 소모가 크고, 외부 신호교란과 보안에 취약하다는 단점이 존재 한다. 따라서 RF 기반 센서 네트워크의 단점을 극복하기 위해 광신호 기반 센서 네트워크에 대한 연구가 대두되어 왔다. 지향성이 뛰어난 광신호는 외부 신호교란과 외부의 감청에 강건한 특성을 가지고 있으며 반사체를 사용하여 통신할 경우 배터리 소모를 절감시킬 수 있다. 광신호 기반의 무선 센서 네트워크의 사례로는 미 국방성의 무선 광 통신에 관한 Smart Dust 프로젝트가 있다. 하지만 선행연구에서는 데이터 수집에 관한 연구만 이루어졌을 뿐 센서 노드 위치 인식에 관한 연구는 수행되지 않았다. 최근에 들어서야 ToF를 이용한 스캐닝 기법에 대한 연구가 진행되고 있으며 상용 CCR을 이용한 연구가 수행된바 있다[6]. 하지만 기존의 연구는 상용 CCR을 이용하여 진행되었고 MEMS CCR을 이용하면서 발생할 수 있는 현상과 위치 인식을 위한 광신호 출력에 대한 분석이 수행되지 않았다.

ToF를 이용한 스캐닝 기법은 회전하는 베이스 스테이션에서 획득하는 거리, 각도 정보를 이용하여 센서 노드의 위

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2011. 7. 5., 수정: 2012. 9. 25., 채택확정: 2013. 2. 4.
장우협: 서울대학교 기계항공공학부(whjang@minfinity.com)
박찬국: 서울대학교 기계항공공학부/자동화시스템공동연구소(ASRI) (chanpark@snu.ac.kr)
※ 본 논문은 방위사업청 지정 국방MEMS특화연구센터에서 지원하여 연구하였음(과제번호:UD090024FD).

Copyright© ICROS 2013

치를 인식하는 기법이다. 이때 스캐닝 분해능에 따라 동일 센서 노드를 여러 각도에서 인식하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 이에 대한 사전 분석이 이뤄져야 거리 오차를 감소시킬 수 있고 하나의 센서 노드를 서로 다른 센서 노드로 인식하는 것을 방지할 수 있다. 또한 광 발산 각도와 반사되는 과정으로 인해 광신호의 출력이 감소하게 된다. 이는 원거리의 센서 노드 인식을 수행할 수 없게 하므로 센서 노드 위치 인식 시스템의 설계에 있어서 광신호 출력에 대한 고려는 필수적이다.

본 논문에서는 광신호 기반의 무선 마이크로 센서 네트워크의 센서 노드 위치 인식에 사용될 수 있는 기법 중에 하나인 ToF를 이용한 스캐닝 기법에 대한 분석을 수행하였다. 광 반점 면적(beam spot)의 지름, 스캐닝에 따른 광 반점의 이동거리, 반사체의 폭에 따라 동일한 센서 노드를 여러 각도에서 인식하는 상황에 대해 규명하였으며 광신호 출력 감소 요인에 대한 분석을 수행하였다. 2차원 센서 노드 위치 인식 실험을 통해서 검출 각도 개수의 경향성과 광신호의 출력 감소를 확인하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에는 ToF 스캐닝 기법의 원리에 대해 소개고 2.2절에서는 거리에 따른 검출 각도 범위, 광신호 면적, 광신호 세기에 대해 설명한다. III 장에서는 실험결과에 대해 설명하며 IV 장에서 결론을 맺는다.

## II. ToF를 이용한 센서 노드 위치 인식 기법

### 1. ToF 스캐닝 기법 원리

2차원 센서 노드 위치 인식은 독립적인 두 개의 위치 정보를 융합하여 이루어진다. ToF를 이용한 센서 노드 위치 인식 기법은 스캐닝 하는 베이스 스테이션에서 획득하는 거리, 각도 정보를 이용하는 것으로써 ToF로 계산된 베이스 스테이션과 센서 노드사이의 거리와 거리가 측정될 때의 각도 정보를 이용하여 센서 노드의 위치를 획득한다.

그림 1은 ToF 스캐닝 기법의 개념을 나타낸다. ToF 스캐닝 시스템은 펄스 레이저 모듈, 두 개의 광 검출기, 광 분리기, 회전을 구동하는 모터, 회전각을 측정하는 엔코더, 시간차를 계산하기 위한 TDC (Time to Digital Convertor), 시스템을 제어하며 데이터를 처리하는 PC로 구성 된다. 거리 측정에 대한 자세한 설명은 다음과 같다. 펄스 레이저 모듈에서 출발한 광신호는 광 분리기를 거쳐 두 개의 광신호로

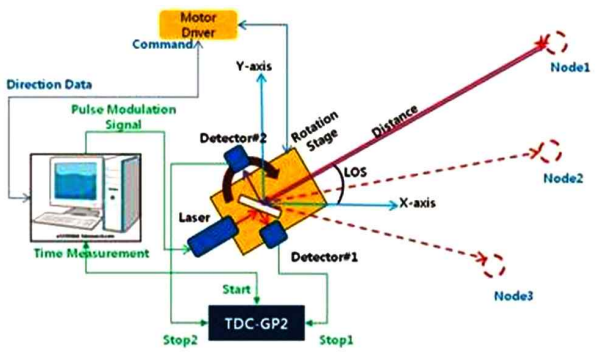



그림 1. ToF 스캐닝 기법 개념도.
Fig. 1. Conceptual design of ToF scanning technique.

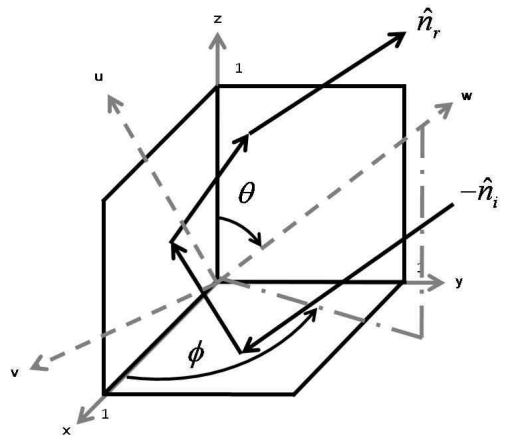



그림 2. MEMS CCR 개념도.
Fig. 2. Conceptual design of MEMS CCR.

분리된다. 이때 하나의 신호는 광 검출기 1로 향하게 되어 시작 시간이 측정 되고 나머지 신호는 반사체를 포함한 센서 노드를 향해 진행한다. 반사체에 반사되어 돌아온

$$d = \frac{1}{2}\Delta t \times c \tag{1}$$

광신호는 다시 광 분리기를 거치고 광 검출기 2에 검출됨으로써 종료시간이 측정 된다. 이때 측정된 시작 시간과 종료 시간의 차이는 베이스 스테이션과 센서 노드 사이 거리의 두 배에 해당하는 값이므로 식 (1)과 같이 $\frac{1}{2}$을 곱해서 실제 거리를 다음과 같이 계산하게 된다.

여기서 $\Delta t$는 시작 시간과 종료 시간의 차이, $c$는 빛의 속도를 의미한다.

그림 2는 센서 노드에 포함되어 있는 반사체인 MEMS CCR (Corner Cubic Retroreflector)의 개념도 이다. MEMS CCR은 광신호를 입사한 방향($n_i$)의 평행한 방향($n_r$)으로 반사하는 특징을 가지는 초소형 반사체이며 세 반사면이 서로 수직을 이루는 구조의 형태이다. 세 반사면이 서로 수직을 이루고 있으므로 MEMS CCR의 자세와 관계없이 입사한 방향의 평행한 방향으로 빛을 반사할 수 있다. 따라서 주기적으로 펄스 레이저를 발생시키면서 회전하는 베이스 스테이션에서 MEMS CCR에 반사되어 돌아오는 광신호를 감지하고 이때의 시간차와 회전 각도를 이용하여 센서 노드의 위치를 인식하게 된다[6].

### 2. ToF 스캐닝 기법 분석

#### 2.1 거리에 따른 검출 각도 범위

ToF 스캐닝 기법에서는 회전하는 베이스 스테이션에서 센서 노드의 위치를 추정하게 되므로 하나의 센서 노드가 여러 각도에서 검출될 수 있고 광 반점 면적의 지름($b$), 스캐닝에 따른 광 반점의 이동거리($l$), MEMS CCR의 폭($m$)의 상대적인 크기에 의해 각 경우의 수가 결정된다. 광 반점 면적의 지름과 광 반점의 이동거리는 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 커질수록 증가하며 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

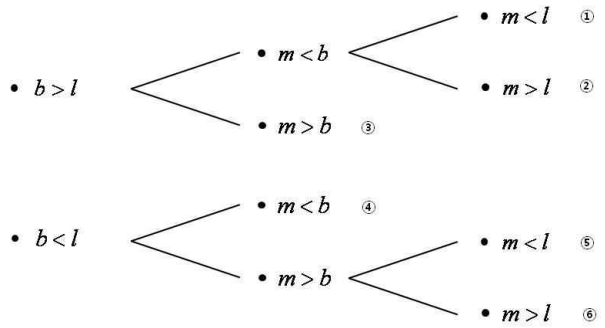



그림 3. 검출 각도의 경우의 수.
Fig. 3. Case number of detection angle range.

$$b \cong 2d \tan\theta_d \tag{2}$$

$$l = 2d \tan\frac{\theta_s}{2} \tag{3}$$

여기서 $d$는 베이스 스테이션과 센서 노드사이의 거리, $\theta_d$는 광 발산 각도, $\theta_s$는 스캐닝 각도 분해능을 의미한다.

검출 각도는 세 가지 변수의 순열로 결정되기 때문에 그림 3에서 볼 수 있듯이 ①~⑥ 총 6가지 경우의 수가 발생한다. 여기서 $m$은 MEMS CCR의 크기, $l$은 광 반점의 이동거리, $b$는 광 반점의 면적의 지름을 의미한다. 광신호의 폭이 MEMS CCR의 폭보다 작은 경우에는 광신호의 모든 면적이 MEMS CCR에 닿아야 검출이 가능하다고 가정하고, 광신호의 폭이 MEMS CCR의 폭보다 클 때에는 MEMS CCR 전체가 광신호 면적 안에 있어야 검출이 가능하다고 가정한다. 광신호 면적의 일부만 MEMS CCR에 닿아도 되돌아오는 광신호의 출력이 검출 가능한 광신호의 출력 이상이면 센서 노드의 위치를 인식할 수 있지만 MEMS CCR에 동일한 면적에 반사되더라도 거리에 따라 검출의 유무가 변할 수 있기 때문에 이러한 경우는 검출이 불가능하다고 가정한다.

그림 4는 6가지 경우에 따른 $m$, $l$, $b$의 상대적인 크기를 나타낸 것이고 표 1은 각각의 조건에 따른 센서 노드 검출 각도 수를 나타낸다. 경우 ①, ②, ③은 광 반점의 이동거리 보다 광 반점의 지름이 더 큰 경우로써 이전 스캐닝 단계의 광 반점과 다음 스캐닝 단계의 광 반점이 공유하는 영역이 있는 경우이다. 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 증가할수록 $m$이 $b$, $l$ 보다 상대적으로 작아지므로 조건이 ③, ②, ① 순서로 바뀌게 된다. 경우 ④, ⑤, ⑥은 광 반점의 이동거리 보다 광 반점의 지름이 더 작은 경우로써 이전 스캐닝 단계의 광 반점과 다음 스캐닝 단계의 광 반점이 공유하는 영역이 없는 경우이다. 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 증가할수록 $m$이 $b$, $l$ 보다 상대적으로 작아지므로 조건이 ⑥, ⑤, ④ 순서로 바뀌게 된다.

④, ⑤의 경우에는 단일 각도에서만 검출이 가능하고 각각 ②, ③ 경우의 식으로 표현할 수 있다. 따라서 $m$, $l$, $b$의 순열에 따라 6가지 경우로 분류할 수 있지만 검출 각도 개수는 식 (4)와 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

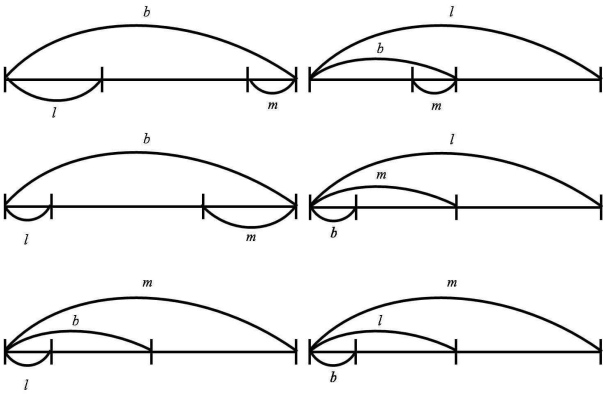



그림 4. 6가지 경우의 수에 따른 $m, l, b$의 상대적인 크기.
Fig. 4. Relative magnitude of $m, l, b$ according to six case number.

표 1. 센서 노드 검출 각도 수.
Table 1. Detection angle range of sensor node.

| 경우 | 조건 | 검출 각도 수 |
|---|---|---|
| ① | $b > l > m$ | $\left\lfloor \frac{b-m}{l} \right\rfloor$ |
| ② | $b > m > l$ | $\left\lfloor \frac{b-m}{l} \right\rfloor$ |
| ③ | $m > b > l$ | $\left\lfloor \frac{m-b}{l} \right\rfloor$ |
| ④ | $l > b > m$ | 단일 각도( $\left\lfloor \frac{b-m}{l} \right\rfloor$ ) |
| ⑤ | $l > m > b$ | 단일 각도( $\left\lfloor \frac{m-b}{l} \right\rfloor$ ) |
| ⑥ | $m > l > b$ | $\left\lfloor \frac{m-b}{l} \right\rfloor$ |

$$N = \left\lfloor \left| \frac{m-b}{l} \right| \right\rfloor \tag{4}$$

여기서 $\lfloor\ \rfloor$는 소숫점 버림 기호를 의미 한다.

### 2.2 광신호 면적

베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 멀어짐에 따라 광신호의 발산 각도에 의하여 센서 노드에 도달하는 광신호의 면적이 증가하므로 광 발산 각도와 센서 노드 거리는 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 세기에 영향을 끼치게 된다. 따라서 광신호 면적에 대한 분석이 수행되어야 한다. 광 발산 각도로 인해 펄스 레이저 모듈에서 출발한 광신호는 그림 5의 ①과 같이 면적을 가진 형태로 MEMS CCR에 도달하게 된다. MEMS CCR은 입사한 빛의 방향과 평행한 방향으로 빛을 반사하기 때문에 ②와 같이 면적이 더 넓어진 형태로 반사한다. 광 분리기를 거친 광신호는 입사각과 같은 크기로 광 분리기의 법선 벡터와 반사각을 이루어 ③의 형태로 반사되고 최종적으로 광 검출기 2에 도달하게 된다.

펄스 레이저 모듈에서 출발한 광신호가 MEMS CCR에 도달할 때 광신호의 면적이 MEMS CCR의 면적보다 크면 MEMS CCR의 면적에 해당하는 광신호만 반사한다. 이때

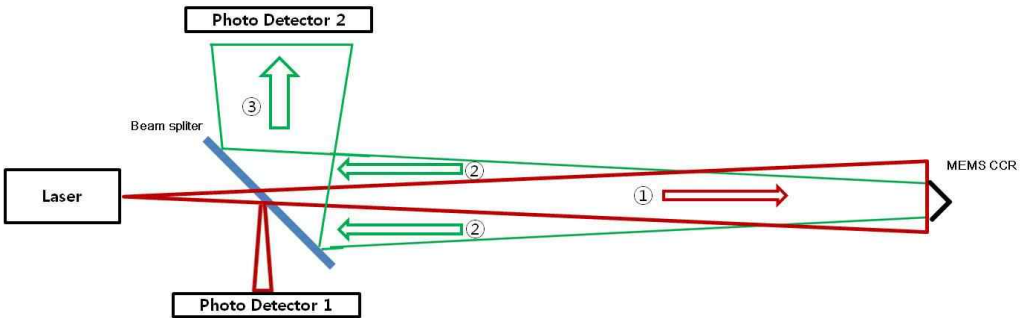



그림 5. 거리에 따른 광 검출기 면적.
Fig. 5. Photo detector area according to sensor node distance.

펄스 레이저 모듈과 광 분리기 사이의 거리가 베이스 스테이션과 센서 노드사이의 거리에 비해 작다고 가정하면 MEMS CCR의 양 끝단에 도달하는 광신호의 입사각($\theta_i$)은 식 (5)와 같이 표현 된다.

$$\theta_i = \pm \tan^{-1}\frac{m}{2d} \tag{5}$$

여기서 $m$은 MEMS CCR의 길이, $d$는 베이스 스테이션과 MEMS CCR 사이의 거리를 의미하고, 그림 5에서 펄스 레이저 모듈의 중심점과 MEMS CCR의 반사면들이 만나는 지점을 이은 선을 기준으로 MEMS CCR의 윗 단에서 반사된 것은 + 부호, 아랫단에서 반사된 것을 - 부호로 정의한다. MEMS CCR이 이상적인 반사체이며 센서 노드 거리에 비해 매우 작다고 가정하고 광 검출기 2와 광 분리기 사이의 거리를 무시하면 식 (5)를 이용하여 광 검출기 2에 도달하는 광신호 면적의 지름($b_{d2}$)을 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{d2} = m + 2d\tan\theta_i = m + 2d\tan(\tan^{-1}\frac{m}{2d}) \approx 2m \tag{6}$$

식 (6)을 살펴보면 광 검출기 2에 도달하는 광신호 면적의 지름은 MEMS CCR의 폭의 2배로 계산된다. 실제 MEMS CCR은 표면 불균일, 반사체면의 비정렬 오차가 존재하므로 MEMS CCR에서 반사되는 광 발산 각도는 식 (6)의 값보다 크다. MEMS CCR의 오차 요인으로 인해 광 발산 각도가 $0.1mrad$ 커진다고 가정하면 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 면적이 약 $2cm$ 로 증가한다.

MEMS CCR에 입사하는 광신호가 세 반사체 면에 모두 동일한 각으로 입사하고 반사되는 광신호의 회절로 인해 광신호의 퍼짐이 Fraunhofer라고 가정하면 MEMS CCR에서 반사되는 광신호의 광 발산 각($\theta_c$)을 식 (7)과 같이 정의할 수 있으며 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 면적의 지름을 식 (8)과 같이 정의 할 수 있다[7].

$$\theta_c \cong \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{a}\right) \approx \frac{\lambda}{a} \tag{7}$$

$$b_{d2} \approx 2d\tan\theta_c \approx 2d\frac{\lambda}{a} \tag{8}$$

2.3 광신호의 세기

베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리와 광 발산 각도에 따라 광신호 세기(intensity)가 변하게 되며 이에 따라 베이스 스테이션의 펄스 레이저 모듈과 광 검출기의 사양이 바뀌게 되므로 이에 대한 분석이 필수적이다. MEMS CCR이 $-\hat{n}_i$ 벡터 방향에 광 분리기가 $\hat{n}_o$ 방향에 놓여있다면 레이저 모듈의 광신호 세기($I_i$)와 광 검출기2에 도달하는 광신호 출력($P_{d2}$)사이의 관계는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{rec} = I_i r^3 \int_{\Omega_o} \frac{d\sigma}{d\Omega_o}(\hat{n}_i, \hat{n}_o) d\Omega_o \tag{9}$$

여기서 $\Omega_o$는 광 분리기에서 측정된 MEMS CCR과 광 분리기 사이의 입체각(solid angle, 단위 : $sr$) 으로써 광 검출기 2의 면적을 $A_{d2}$, 베이스 스테이션과 MEMS CCR 사이의 거리를 $d$라고 하면 $\Omega_r = A_{d2}/d^2$ 로 나타낼 수 있고, $d\sigma / d\Omega_o(\hat{n}_i, \hat{n}_o)$는 미분 산란 단면적(differential scattering cross section)으로써 단위 세기로 방사된 광신호가 반사되었을 때의 단위 입체각 당 광신호 출력($(W/sr)/(W/m^2)$)을 의미하며 MEMS CCR에 광신호가 입사하는 방향에 따라 변한다[8,9].

그림 5처럼 광 분리기와 MEMS CCR이 동일 선상(collinear, $\hat{n}_o = -\hat{n}_i$)에 놓여 있고 베이스 스테이션과 MEMS CCR 사이 거리 $d$가 충분히 커서 입체각 $\Omega_r$이 작다고 가정하면 식 (9)를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{d2} \approx I_i r^3 \frac{d\sigma}{d\Omega_o}(\hat{n}_i, -\hat{n}_i)\Omega_o = I_i r^3 \frac{d\sigma}{d\Omega_o}(\hat{n}_i, -\hat{n}_i)\frac{A_{d2}}{d^2} \tag{10}$$

광신호의 면적을 $A_{spot}$이라 하면 광신호의 세기는 $I_i = P_i / A_{spot}$ 이므로 미분 산란 단면적은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_o}(\hat{n}_i, -\hat{n}_i) = \frac{P_{d2}}{I_i \Omega_r} = \frac{P_{d2}}{P_i} \times \frac{A_{spot}}{A_{d2}/d^2} \tag{11}$$

식 (11)에서 레이저 모듈의 광신호 출력과 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 출력사이의 관계($P_{d2}/P_i$)를 통해 미분 산란 단면적을 구할 수 있다. 먼저 광 분리기를 거친 광신호는 출력이 반으로 감소하므로 레이저 모듈의 광신호 출력과 반사된 광신호 출력사이의 관계식은 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$P_r = \frac{P_i}{2}\frac{A_{CCR}}{A_{spot}}R_{CCR} = \frac{P_i}{2}\frac{3a^2}{A_{spot}}r_{CCR}{}^3 \tag{12}$$

여기서 $A_{CCR}$은 MEMS CCR의 면적으로써 세 반사면에 반사된다고 하면 $3a^2$로 나타낼 수 있고, $R_{CCR}$은 MEMS CCR의 반사율로써 각 반사체 면의 반사율($r_{CCR}$)의 세제곱으로 표현할 수 있다. 그 다음으로 반사된 광신호는 광 분리기를 통과하여 광 검출기 2로 향하게 되므로 출력이 반으로 감소하게 된다. 따라서 MEMS CCR에 반사된 광신호 출력과 광 검출기 2에 도달하는 광신호 출력사이의 관계는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{d2} = \frac{P_r}{2}\frac{A_{d2}}{(\theta_c d)^2} = \frac{P_r}{2}\frac{A_{d2}}{\frac{\lambda^2}{a^2}d^2} \tag{13}$$

여기서 $(\theta_c d)^2$는 MEMS CCR에 입사하는 광신호가 세 반사체 면에 모두 동일한 각으로 입사한다는 가정 하에 계산된 것으로써 MEMS CCR에서 반사된 광신호가 거리 $d$에 도달했을 때의 면적이다. 따라서 레이저 모듈의 광신호 출력과 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 출력사이의 관계는 식 (14)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (14)을 식 (11)에 대입하여 미분 산란 단면적을 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_{d2}}{P_i} = \frac{3a^2 r_{CCR}{}^3}{2A_{spot}} \times \frac{A_{d2}}{2\frac{\lambda^2}{a^2}d^2} \tag{14}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_o}(\hat{n}_i, -\hat{n}_i) = \frac{3a^4}{4\lambda^2}r_{CCR}{}^3 \tag{15}$$

광 검출을 위해서는 광 검출기에 암전류(dark current) 이상의 전류를 생성시켜야 한다. 따라서 광 검출기 2에 도달하는 광신호 출력은 암전류를 생성시키는 출력보다 커야 한다. 광 발산 각도와 베이스 스테이션과 MEMS CCR 사이 거리 $d$를 이용하여 광신호 면적을 $A_{spot} = \pi d^2 \tan^2\theta_d$로 나타낼 수 있으므로 대기 난류에 의한 영향(atmosphere turbulence)을 무시한다면 레이저 모듈의 광신호 세기와 출력사이의 관계는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_i = \frac{P_i}{\pi d^2 \tan^2\theta_d} \tag{16}$$

식 (15), (16)을 식 (10)에 대입하면 광 검출기 2에 도달하는 광신호의 출력을 식 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{d2} = \frac{3P_i A_{d2} a^4 r_{CCR}{}^3}{4\pi\lambda^2 d^4 \tan^2\theta_d} \tag{17}$$

광 검출기 2에서 생성하는 광전류(photocurrent)는 광 신호의 출력에 감응도(responsivity)의 곱으로 구할 수 있으므로 감응도를 $R$(단위:$A/W$)이라 하면 최종적으로 레이저 모듈의 광신호 출력과 광 검출기 2에 유도되는 전류의 관계식은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{d2} = \frac{3P_i A_{d2} a^4 r_{CCR}{}^3 R}{4\pi\lambda^2 d^4 \tan^2\theta_d} \tag{18}$$

식 (18)을 살펴보면 레이저 출력과 MEMS CCR의 면적이 커질수록 광전류가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 광신호의 면적은 광 발산 각도로 증가하기 때문에 베이스 스테이션과 MEMS CCR의 거리가 멀어질수록 광전류가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 식 (18)을 통해 광신호 기반 센서 노드 위치 인식에서 베이스 스테이션의 변수들이 반사된 광신호의 출력에 영향을 끼치는 정도를 알 수 있다. 이 결과는 센서 노드에서 반사되는 광신호를 검출하기 위하여 베이스 스테이션의 각 변수들을 결정할 때 정량적인 지표로 활용될 것으로 판단된다.

## III. 실험 및 결과 분석

ToF 스캐닝 기법을 이용하여 2차원 마이크로 센서 노드 위치 인식 실험을 수행하였다. 베이스 스테이션에서 $(0^\circ, 25cm)$ 지점에 한 변의 길이가 $300\mu m$의 MEMS CCR을 배치하였으며 20번 반복 실험을 수행하였다. 베이스 스테이션 설정과 실험 조건을 표 2에 정리하였다.

### 1. 검출 각도 범위 분석

표 2의 실험 환경은 $b > l > m$에 해당하므로 표 1의 경우 ①에 해당한다. 따라서 경우 ①의 검출 각도 개수 계산식을 통해 검출 각도 수는 7개로 계산된다. 경우 ①의 계산식은 최소 검출 각도를 나타내는 것으로써 검출되기 시작하는 각도에서 광신호의 일부 면적이 MEMS CCR의 가장 자리의 일부 면적과 겹치는 조건으로 계산된 식이다. 하지만 검출되기 시작하는 각도에서 MEMS CCR의 가장 자리가 광신호 면적의 가장 자리와 일치하면 검출 가능 개수가 1개 더 증가 할 수 있다.

표 2. 베이스 스테이션 설정 및 실험 조건.
Table 2. Base station Setting and experiment condition.

| 광 신호 | | 광 검출기 | |
|---|---|---|---|
| 파장 | $905nm$ | 면적 지름 | $0.4mm$ |
| 평균 출력 | $11mW$ | 암 전류 | $< 0.1nA$ |
| 광 발산 각 | $2mrad$ | | |
| 방사 지름 | $3mm$ | 감응도 | 0.35 ($905nm$) |
| 실험 조건 | | | |
| MEMS CCR 위치 | | $(0^\circ, 25cm)$ | |
| MEMS CCR 한 변 길이 | | $300\mu m$ | |
| 스케닝 각도 분해능 | | $1.7mrad$ | |

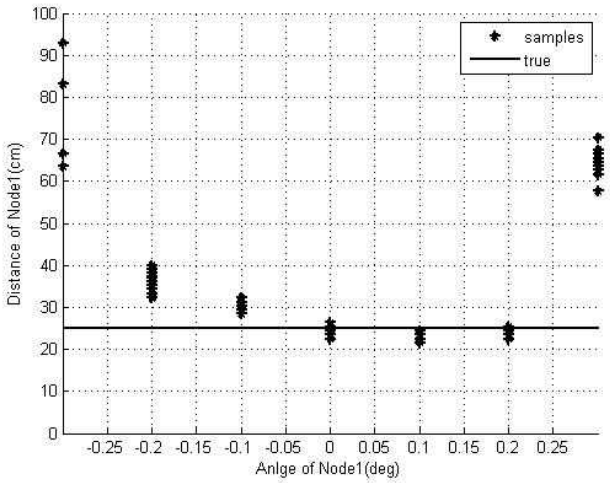



그림 6. 실험 1의 센서 노드 위치 인식 결과.
Fig. 6. Result of sensor node localization.

실험 결과 그림 6을 통해 알 수 있듯이 7개의 각에서 하나의 센서 노드를 인식하였다. 센서 노드의 참 위치를 얻기 위해 MEMS CCR을 베이스 스테이션에서 (0°, 25$cm$)에 배치 시켰으므로 광 신호 면적의 중심에 MEMS CCR이 위치하였다. 즉, 검출되기 시작하는 각도에서 광신호 면적의 가장 자리에 MEMS CCR을 배치한 것이 아니므로 실험을 통해 얻은 결과가 이론적으로 구한 최소 검출 각도 개수와 일치한 결과를 보였다. 일반적으로 센서 네트워크를 구성할 때 광 발산 각도와 MEMS CCR의 폭, 스캐닝 각도 분해능은 설계 및 제작 과정에서 결정되므로 검출 각도 개수는 거리에 따라 고정된다. 따라서 검출 각도 개수와 거리 측정 결과 분석을 통해 왜곡된 신호를 구별 하고 하나의 센서 노드를 서로 다른 센서로 인식하는 것을 사전에 방지할 수 있다.

2. 검출 출력 분석

표 4는 검출 각도에 따른 두 번째 디텍터에서 감지되는 광신호의 출력이다. 0° 근처에서 출력이 크고 검출 각도 범위의 양 끝단으로 갈수록 출력이 감소하는 것을 볼 수 있으며 0° 근처를 중심으로 출력의 크기가 대칭적임을 볼 수 있다. 식 (8)에서 볼 수 있듯이 광 검출기 2의 광신호의 출력은 미분 산란 단면적의 영향을 받게 되는데 미분 산란 다면적은 광신호가 MEMS CCR에 입사하는 방향에 따라 변한다. 따라서 스캐닝 각도에 따라 광 검출기 2의 광신호 출력이 변하는 것으로 판단된다.

표 3. 거리 오차 및 평균 제곱근 오차(RMSE).
Table 3. Distance error and root mean square error.

| | 전체 측정치 사용 | 50% 측정치 사용 |
|---|---|---|
| 오차 | 11.8847$cm$ | 0.4825$cm$ |
| RMSE | 0.6796$cm$ | 0.1835$cm$ |

표 4. 검출 각도에 따른 광신호 출력.
Table 4. Signal power according to detection angle.

| 검출 각도 | -0.3° | -0.2° | -0.1° | 0.0° | 0.1° | 0.2° | 0.3° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 출력 ($\mu W$) | 1.13 | 1.60 | 2.00 | 2.27 | 2.25 | 2.00 | 1.56 |

3. 거리 측정 결과 분석

그림 6은 실험 1의 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 스캐닝 검출 각도 범위의 중심각 근처에서는 거리 측정오차가 작고 중심각에서 벗어난 각에서는 거리 측정 오차가 커지는 것을 볼 수 있다. 검출 각도 양 끝단의 거리오차가 큰 이유는 광 검출기의 전압상승 시간의 차이 때문이다. 광 검출기에 광신호가 들어오면 유도되는 전류로 인해 증가하는 광 검출기의 전압이 일정 문턱치(threshold)를 넘어야 광신호로 인식하게 되는데 이때 광신호 출력이 감소함에 따라 광 검출기의 전압 상승시간(rising time)이 상승하기 때문이다[10]. 따라서 검출 각도 범위 양 끝단의 거리 측정치들은 무시하고 검출 각도 중심 근처의 거리 측정치들의 평균을 센서 노드 거리로 추정할 수 있고 검출 각도 범위의 중심인 0° 를 센서 노드 시선각으로 추정할 수 있다.

본 논문에서는 거리 오차를 줄이기 위해 기존의 상용 CCR을 이용한 위치 인식 기법에 사용되었던 기법인 검출 각도의 양 끝단으로부터 25% 제거된 측정치를 활용한 기법을 사용하였다. 상용 CCR을 이용한 광신호 기반 센서 노드 위치 인식 기법에도 검출 각도의 양 끝단에서 거리 오차가 증가하는 경향을 나타내었고 이를 보상하기 위한 기법으로 종단 50% 제거 기법, 가중치를 이용한 최소 제곱 기법, 곡선 근사화 기법이 제안된 바 있다[6]. 이들 기법 중에서 종단 50% 제거 기법이 다른 기법들에 비해 효율적이며 반복 실험을 통해서 강건한 특성을 갖는 기법으로 간주되기 때문에 본 논문에서는 측정치의 종단 50% 제거 기법을 통해 거리 오차를 보상하였다.

각각 전체 측정치와 50% 제거된 측정치에 대해 계산한 거리오차와 평균 제곱근 오차(root mean square error)를 표 3에 정리하였다. 표 3을 보면 50% 측정치 오차의 평균이 전체 측정치 오차의 평균보다 보다 약 25배 작음을 볼 수 있고 RMSE는 약 3.7배 작음을 확인할 수 있다. 오차의 상대 비율은 2% 미만으로써 검출 각도 범위 양 끝단 거리 측정치의 25%를 제거하는 기법이 센서 노드 위치 인식에 효과적임을 알 수 있다. 또한 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 증가하여도 검출 각도의 양 끝단에서 반사되는 광신호의 출력이 감소하게 되므로 이에 따른 거리 오차가 증가할 것으로 판단된다. 따라서 거리가 증가하여도 측정치의 양 끝단 50% cm 제거 기법이 거리 오차 추정에 효과적일 것으로 판단된다.

## IV. 결론

본 논문에서는 광신호 기반 마이크로 센서 네트워크의 센서 노드인식 기법인 ToF를 이용한 스캐닝 기법에 대한 분석과 2차원 센서 노드 위치 인식 실험을 수행하였다.

일정 간격으로 회전하는 베이스 스테이션에서 센서 노드를 검출함에 따라 발생하는 상황인 하나의 센서 노드를 여러 각도에서 인식하는 경우에 대해서 분석하였다. 센서 노드 검출 각도 개수는 광 반점 면적의 지름, 스캐닝에 따른

광 반점의 이동거리, MEMS CCR의 폭의 상대적인 크기 조합에 따라 변하게 된다. 광 검출기는 암전류 이상의 전류를 생성시키는 신호를 광신호로 인식하게 되므로 레이저 모듈의 출력과 광 검출기 2에 도달하는 출력 사이의 관계에 영향을 미치는 요소에 대한 분석을 수행하였다. 두 번째 검출기에 도달하는 광신호의 출력은 MEMS CCR에 입사하는 방향에 따라 변하는 미분 산란 단면적에 영향을 받고 레이저 모듈의 출력과 MEMS CCR의 폭이 커질수록 증가하며 광 발산 각도와 베이스 스테이션과 센서 노드사이의 거리가 증가할수록 작아지는 특성을 보인다.

MEMS CCR의 거리가 실험 환경에서 검출될 수 있는 최대 검출 각도 개수 보다 작은 개수에서 측정되었으며 예상되는 검출 각도 개수와 거리 측정치의 경향성을 바탕으로 각도 오차를 감소시키고 이상신호를 감지하며 하나의 센서 노드를 서로 다른 센서 노드로 인식하는 상황을 방지할 수 있다. 실험 결과 검출 각도의 양 끝단으로 갈수록 거리 오차가 증가하는 것으로 확인되었고 이것의 원인은 광 검출기의 상승시간의 차이 때문이다. 광 검출기의 상승시간이 변하는 이유는 MEMS CCR에 입사하는 방향에 따라 변하는 미분산란단면적의 영향으로 광 검출기 2에 도달하는 광신호 출력이 변하게 되고 광신호 출력은 광 검출기의 상승시간에 영향을 주기 때문이다. 따라서 기존의 상용 CCR을 이용한 거리 오차 보정을 위해 사용된 기법인 검출 각도의 양 끝단으로부터 거리 측정치의 25%를 제거하여 평균한 기법이 MEMS CCR을 이용한 센서 노드 위치 인식에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

## 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] http://www.cmc-amman.gov.jo

[3] http://www.L-3com.com/cs-east

[4] http://www.lockheedmartin.com/data/assets/mfc/PC/MFC_SCOUT_pc.pdf

[5] http://plum.hufs.ac.kr/hsn2009/pdf

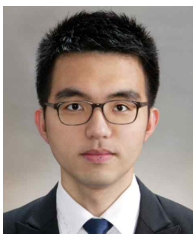
[6] J. Kim, “Localization methods of sensor node in wireless optical sensor network,” *Master degree thesis, Seoul National University (in Korean)*, 2011.

[7] R. D. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1990.

[8] 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.

[9] 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.

[10] C. K. Sun, P. K. L. Yu, and C.-T. Chang, “Simulation and interpretation of fast rise time light-activated p-i-n diode switches,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39, no. 10, pp. 2240-2247, 1992.


**장 우 협**

2010년 인하대학교 항공우주공학과 졸업. 2012년 서울대학교 기계항공공학부 대학원 졸업(공학석사). 2012년~현재 ㈜마이크로인피니티 근무. 관심분야는 관성항법시스템, 센서 네트워크.

**박 찬 국**

1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술연구센터 Post Doc. 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수. 1998년 미국 UCL. 기계항공공학과 방문연구원. 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원. 2003년~현재 서울대하교 기계항공공학부 부교수/교수. 연구 관심분야는 INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링 기법, FDIR 시스템.