



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

다중 베이스 스테이션을 이용한 광신호
기반 센서 노드 위치 인식의 성능 향상

Enhancement of Optics-Based Sensor Node
Localization using Multiple Base Stations

2013 년 8 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

전 지 훈

다중 베이스 스테이션을 이용한 광신호 기반 센서 노드 위치 인식의 성능 향상

Enhancement of Optics-Based Sensor Node
Localization Using Multiple Base Stations

지도교수 박 찬 국

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013 년 8 월

서울대학교 대학원
기계항공공학부
전 지 훈

전지훈의 공학석사 학위논문을 인준함

2013 년 8 월

위원장 : 김 유 안 (인) 

부위원장 : 박 찬 국 (인) 

위 원 : 김 현 진 (인) 

초 록

본 논문에서는 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) CCR(Corner Cube Retroreflector)을 이용한 광 신호 기반 무선 센서 네트워크의 센서 노드 위치 인식을 수행하기 위해 실제 환경에서 발생할 수 있는 문제점들을 분석하여 이를 극복하기 위한 다중 베이스 스테이션 시스템을 제안한다. 그 후 제안한 시스템을 이용한 위치 실험을 통하여 그 성능을 검증한다. 광 신호 기반 센서 노드 위치 인식 시스템은 회전하는 베이스 스테이션에서 발사된 광신호의 출발시간과 센서 노드에 부착된 MEMS CCR 에 반사되어 되돌아오는 도착시간 차이를 이용하여 거리를 계산하고, 거리가 계산될 때의 베이스 스테이션의 회전각을 측정함으로써 이루어진다. MEMS CCR 은 세 개의 반사면이 서로 수직을 이루고 있는 마이크로 미터 급의 크기의 반사체로써 입사한 광 신호를 입사 방향의 평행한 방향으로 반사시킬 수 있다. 실제 이 시스템을 가지고 MEMS CCR 을 위치 인식하는 센서 네트워크를 구성할 때 문제점이 발생한다. 첫째로 MEMS CCR 에서 반사되어 베이스 스테이션으로 돌아오는 광

신호의 세기가 미약하여 약 30~40cm 정도 밖에 측정 거리가 되지 않는 문제점과, 무작위적으로 분포된 센서 노드가 베이스 스테이션과 일직선으로 배열될 경우 광 신호의 직진성으로 인해 광 신호가 도달하지 못해 위치 인식이 되지 않는 문제점이다. 이를 해결하고자 본 논문에서는 다음과 같은 방안을 연구하였다. 먼저 MEMS CCR 에 광신호가 반사되어 베이스 스테이션으로 돌아오는 과정을 분석하여 베이스 스테이션에서 MEMS CCR 을 검출하기 위해 필요한 하드웨어의 사양에 대한 분석을 수행하였다. 그 다음으로 베이스 스테이션 시스템의 구조를 변경하여 다른 위치 인식 기법을 사용하거나 MEMS CCR 의 변경을 제안하여 결과적으로 기존의 측정 가능 거리를 4 배 이상 향상 시켰다. 무작위적으로 분포된 센서 노드의 문제는 기존의 단일 베이스 스테이션이 아닌 다중 베이스 스테이션 시스템을 제안하여 해결하였다. 그 후 위의 두 문제점을 해결하는데 사용된 다중 베이스 스테이션 시스템을 적용한 센서 노드 위치 인식 실험을 통하여 위치 인식 성능의 향상 면에서도 효용성이 있음을 확인하였다. 이를 통해 실제 센서 네트워크 구성에

다중 베이스 스테이션 시스템이 필수적이라는 결론을 내릴 수 있었다.

주요어: 센서 네트워크, 센서 노드 위치 인식, ToF(Time of Flight), MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) CCR(Corner Cube Retroreflector)

학번: 2011-23343

목 차

초록.....	i
목차.....	iv
표 목차.....	vi
그림 목차.....	vii
1. 서 론.....	1
1.1. 연구 배경.....	1
1.2. 연구의 목적 및 내용.....	6
2. 위치 인식 시스템 분석.....	9
2.1 ToF 스캐닝 시스템의 원리.....	9
2.2 실제 적용에 발생하는 문제점 분석.....	13
3. 실제 적용을 위한 시스템 개선 연구.....	15
3.1 거리에 따른 검출 조건 분석.....	17
3.1.1 입사 광 신호의 광 밀도.....	19
3.1.2 유효 반사 면적.....	21
3.1.3 반사율.....	24
3.1.4 광 분리기.....	25
3.1.5 최대 반사 광 신호 세기.....	26
3.1.6 이론 식과 측정치의 비교.....	27
3.1.7 이론 식을 통한 파라미터 식별.....	29

3.2	베이스 스테이션의 변경을 통한 성능 향상	31
3.2.1	AoA 위치 인식 기법	34
3.2.2	Lighthouse 위치 인식 기법.....	36
3.2.3	위치 인식 기법의 성능 비교.....	38
3.3	MEMS CCR의 변경을 통한 성능 향상	40
3.4	다중 베이스 스테이션 구성	43
4.	위치 인식 실험 및 결과 분석	45
4.1	실험 조건	46
4.2	실험 결과 분석.....	48
5.	결론 및 추후 연구 과제	52
	참고문헌.....	55
	Abstract	59
	감사의 글.....	61

표 목차

표 1. 선진국 및 국내의 센서네트워크 기술동향.....	2
표 2. 베이스 스테이션의 변수	26
표 3. 거리에 따라 필요한 레이저의 출력	29
표 4. 센서노드 위치 인식 결과.....	38
표 5. 베이스 스테이션에 사용된 하드웨어.....	46
표 6. 다중 베이스 스테이션의 위치 인식 결과 비교.....	50

그림 목차

그림 1. Smart dust의 개념도	4
그림 2. Smart dust의 실제 사진	4
그림 3. ToF 스캐닝 시스템의 개념도.....	9
그림 4. ToF 스캐닝 시스템의 실제 사진.....	10
그림 5. ToF의 측정 원리.....	11
그림 6. MEMS CCR의 개념도 및 실제 사진	12
그림 7. 광 검출기 앞에 설치된 Collimator.....	13
그림 8. 베이스 스테이션의 센서 노드 검출 조건.....	17
그림 9. 거리에 따른 광 신호의 면적	20
그림 10. 입사 광 신호의 퍼짐 각과 면적	20
그림 11. MEMS CCR에 입사하는 광 신호의 방향.....	21
그림 12. MEMS CCR의 최대 유효 반사 면적	22
그림 13. 실험 환경에서의 최대 유효 반사 면적.....	22
그림 14. 입사각에 따른 유효 반사 면적	23
그림 15. 광 분리기	25
그림 16. 반사 광 신호 측정 값과 이론 값의 비교.....	28
그림 17. APD의 실제 모습	31
그림 18. 반사 광 신호 측정 값과 이론 값의 비교.....	32
그림 19. AoA 결정 기법.....	34
그림 20. AoA를 이용한 센서노드 위치 결정기법.....	35

그림 21. AoA를 이용한 센서노드 위치 계산	35
그림 22. Lighthouse 기법을 이용한 센서노드 위치 결정.....	37
그림 23. Lighthouse 기법을 이용한 센서노드 위치 계산.....	37
그림 24. AoA 및 Lighthouse 기법을 이용한 위치 인식 실험	38
그림 25. MEMS CCR 앞에 설치한 렌즈.....	40
그림 26. 다중 배열 MEMS CCR.....	42
그림 27. MEMS CCR 과 다중 배열 MEMS CCR의 비교.....	42
그림 28. 무작위적으로 위치한 센서 노드	43
그림 29. 위치 인식이 불가능한 상황	44
그림 30. 다중 베이스 스테이션을 통한 해결	44
그림 31. 다중 베이스 스테이션 위치 인식 실험 환경	47
그림 32. Vicon 카메라를 통한 위치 레퍼런스 획득.....	47
그림 33. 위치 인식 실험 결과	48
그림 34. 각도와 거리로 정리한 ToF 위치 인식 결과.....	49
그림 35. ToF 위치 인식 결과의 후처리.....	49

1. 서론

1.1. 연구 배경

각종 범죄 예방 및 과학적 목적으로의 사용을 위해 특정 지역의 이상 움직임을 감지 및 측정하는 등의 원격 감시 기술들이 요구되고 있다. 특히 휴전선을 중심으로 북한과 대치하고 있는 우리나라의 경우 군부대의 움직임 감지 및 침투의 조기 발견은 아군의 피해를 예방하는데 필수적이다. 북한의 도발을 예방하기 위해 많은 인력과 장비들을 투입하고 있지만 최근 북한군의 노크 귀순 등의 사건을 봤을 때 군 인력과 시간 및 비용만을 소비할 뿐 괄목할 만한 성과를 거두지 못하고 있다고 할 수 있다. 이러한 상황에서 적의 이상 움직임에 대해 즉각적으로 대처하고 효율적인 경계 병력의 운용을 위한 무인 감시 시스템에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있고 많은 연구가 수행되고 있다.

무인 감시 시스템은 정보 수집의 목적을 가지고 특정 지역에 적외선, 압력, 진동 센서 등이 포함된 소형의 센서 노드를 배치하여 주변 지역의 정보를 획득하는 RF 기반의 무선 센서 네트워크 중심으로 연구되어 왔다. 외국의 사례를 보면 미국과 EU를 중심으로 RF기반의 무인 감시 장비 개발에 관한 연구가 진행되어 왔다. 미국의 경우 Sandia Lab.에서 개발한 MIDS(Mini Intrusion Detection System)[1]와 미 해군에서 운용중인

TRSS(Tactical Remote Sensor System), L-3 Communication system의 IREMBASS(Improved Remotely Monitored Battlefield Sensor System)[2], Lockheed Martin사의 SCOUT(Surveillance Collection Observation Unit)[3], Textron System사의 ADAS(Air Deliverable Acoustic Sensor)[4] 등이 있다. 민간의 경우 버클리 대학에서 Motes, MICA, PicoNode등의 센서노드를 개발하였고[5, 6], UCLA에서는 iBadge, Medusa MK-II[6], MIT에서는 uAMPs 등을 개발함으로써 마이크로 센서 네트워크 기반의 어플리케이션에 대한 연구가 수행되어 왔다[7, 8].

표 1. 선진국 및 국내의 센서네트워크 기술동향

국내	유비쿼터스 센서 네트워크 기술과 관련하여 기업체와 연구소를 중심으로 하드웨어, 네트워크 관련 기술이 고르게 연구되고 있음
미국	<ul style="list-style-type: none"> • MIDS, TRSS, IREMBASS, SCOUT 등의 시스템이 개발되어 운용 중 • 민간의 경우 UC Berkeley, UCLA, MIT 등의 대학에서 하드웨어 시스템을 개발, 어플리케이션에 대한 연구를 수행 • 미국 밴더빌트 대학의 PinPtr 프로젝트: 음향 센서로 총알 탐지 및 궤적 추정, 추정된 궤적을 바탕으로 저격수 위치 추적
유럽	영국에서 개발한 CLASSIC 시스템을 NATO 12개국을 포함한 35개국에서 운용 중



이러한 RF 기반의 센서 네트워크에서의 센서 노드 위치 인식에는 ToA(Time of Arrival), ToF(Time of Flight), TDoA(Time Differential Arrival), AoA(Angle of Arrival), RSSI(Received Signal Strength

Identification) 등의 방법들이 사용 된다[9-12]. ToA, ToF 기법은 신호가 도착하는 시간으로 계산된 시선거리를 이용한 방법으로써 세 지점에서 계산된 시선거리로 각각의 원을 만들고 세 원의 교차점을 센서 노드로 추정하는 방법이다. TDoA 기법은 센서 노드와 다수의 베이스 스테이션간의 신호 도착 시간 차이를 계산하여 각 베이스 스테이션과 센서 노드의 거리 차가 일정한 지점을 계산하여 센서 노드의 위치를 추정하는 방법이다. AoA는 방향각을 이용하는 기법으로써 세 개의 베이스 스테이션에서 측정된 방향각과 기하학적인 조건을 이용하여 센서 노드의 위치를 추정할 수 있다. RSSI는 베이스 스테이션에서 수집된 신호의 세기를 사전에 수집된 측정치의 확률 분포를 이용하여 센서 노드의 위치를 추정하는 기법이다. 이 기법들은 모두 RF 신호를 사용하기 때문에 주변에 발생하는 외부 교란 및 외부 감청에 대해 취약한 특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 RF 기반 센서 네트워크의 단점을 극복하기 위해 광신호를 이용한 시도가 이루어지고 있다. 광신호는 지향성이 뛰어나기 때문에 적 또는 외부에서의 감청 및 교란에 강건한 특성을 가지고 있으며 센서 노드에 반사체를 사용할 경우 송신에 쓰이는 에너지를 절감할 수 있어 배터리 소비의 문제를 해결할 수 있다.

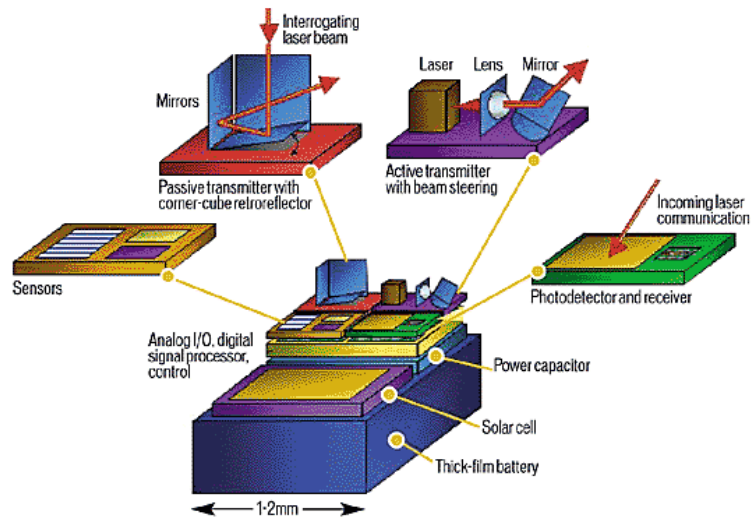


그림 1. Smart dust 의 개념도

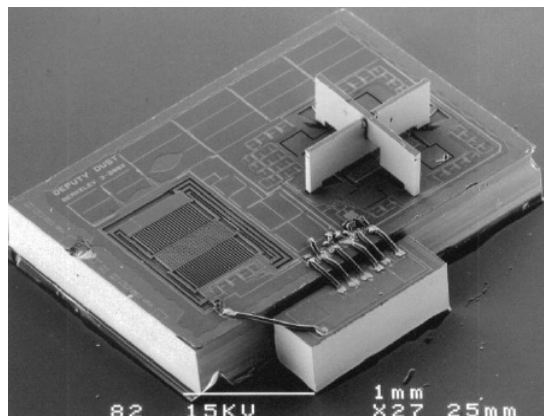


그림 2. Smart dust 의 실제 사진

광신호를 이용한 센서 네트워크 연구로는 UC Berkeley의 Smart Dust가 있다. MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) CCR(Corner Cube Retro-reflector)이라는 세 개의 반사면이 서로 수직을 이루는 초소형 반사체를 사용함으로써 센서 노드에 입사한 광신호에 평행한 방향으로 빛을 반사 시킬 수 있으며 한 면을 어긋나게 함으로써 반사된 광 신호의 방향을 바꿔 신호를 전송하지 못하게 할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 센서 노드에서 수집된 정보를 베이스 스테이션에 전송하는 연구가 이루어 졌다[13-16]. 이러한 연구의 일환으로 순수 물리학[17-20]과 차량 보호 표지, 달 착륙 보조 항법 장치 등 응용 물리학[21-24]에 사용되는 상용 CCR을 센서 노드에 설치하여 광 신호로 센서 노드를 위치 인식하는 연구가 수행된 바 있다. 기존 연구에서는 광 신호로 위치 인식을 하기 위한 베이스 스테이션을 구현하였고 센서 노드 위치 오차 보상기법에 관한 연구[25]와 상용 CCR 대신 MEMS CCR을 위치 인식하기 위한 연구[26]가 수행되었다. 하지만 광학기반 센서 네트워크의 목적 중에 하나인 군사용 감시 정찰 목적을 달성하기 위해서는 여러 추가 연구가 필요한 실정이다.

1.2. 연구 목적 및 내용

RF는 방사형으로 퍼지는 특성을 가지고 있기 때문에 이러한 특성을 이용하여 1.1절에서 소개한 위치 인식 기법들을 사용한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 이러한 기법들은 신호를 발생시킬 수 있는 센서 노드인 능동형(active) 센서 노드를 사용할 때 적용할 수 있는 기법들이다. 광신호를 이용한 위치 인식에서는 배터리 소비를 줄이기 위해 베이스 스테이션에서 발생시킨 신호를 수신하는 기능만을 포함하는 수동형(passive) 센서 노드를 사용하고 광신호가 RF와는 달리 지향성이 뛰어난 특성을 가지고 있으므로 베이스 스테이션과 센서 노드 사이에 시선각이 확보되지 않으면 센서 노드의 위치 검출이 불가능하다. 따라서 센서 네트워크에서 사용되는 매개체가 RF에서 광신호로 대체됨에 따라 기존에 사용되는 센서 노드 위치 인식 기법의 개선이 필요하다.

일반적으로 광신호 기반의 센서 네트워크에서 사용될 수 있는 센서 노드 위치 인식 기법은 ToF와 AoA를 이용한 스캐닝 기법이다[25]. 회전하는 베이스 스테이션에서 센서 노드를 향해 발사된 광신호의 출발 시간을 측정하고 센서 노드에 부착된 반사체에 반사되어 되돌아오는 광신호의 종료 시간을 측정한 뒤 측정된 두 신호의 시간차인 ToF를 이용하여 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리를 구할 수 있다. ToF가 측정될 때의 베이스 스테이션의 회전각을 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의

AoA로 인식하게 되어 두 가지 정보를 통해 2차원 평면상의 센서 노드 위치 인식을 수행할 수 있다. 이때 센서 노드의 반사체로 사용되는 것이 CCR 이다. CCR은 세 반사면이 서로 수직을 이루고 있는 반사체 이다. 따라서 무작위로 흩뿌린 센서 노드들의 자세와 관계 없이 광신호가 반사체에 닿기만 하면 입사 방향의 반대방향으로 광신호를 반사시킬 수 있다. 하지만 마이크로 미터 급의 MEMS CCR의 경우 수 센티 미터 급의 상용 CCR에 비해 반사 면적이 급격히 감소하게 되므로 반사하는 광신호의 출력이 현저히 감소하여 베이스 스테이션에서 반사되는 신호를 감지 하지 못하는 상황이 발생할 수 있다.

실제로 MEMS CCR을 이용하여 광 신호 기반의 센서 네트워크를 구성하기 위해 위치 인식을 수행해보면 미약한 반사 광 신호의 세기에 의해 측정 가능 거리가 약 30~40cm 밖에 되지 않는다. 또한 MEMS CCR에 입사하는 방향에 따라 유효 반사 면적이 변하게 되어 이에 따라 반사되는 광신호의 출력이 변하게 되므로, 입사하는 방향에 따라 약 30~40cm의 측정 가능한 거리마저도 감소하게 된다. 이 외에도 센서 네트워크를 구성하기 위해 무작위적으로 분포된 센서 노드의 상황을 고려하면 베이스 스테이션과 센서 노드들이 일직선으로 배열되어 시선각이 확보되지 않아 측정이 불가능한 상황이 발생할 수 있다. 위에서 언급한 문제점들이 실제 광 신호 기반의 센서 네트워크를 구성하는데 큰 난관이 되므로 이를 극복하기 위한 시스템이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 실제로 MEMS CCR 을 위치 인식할 때 발생할 수 있는 문제점을 분석하고 이를 해결하는 데 초점을 맞추었다. 먼저 측정 가능한 거리를 향상 시키기 위하여 MEMS CCR 에 반사되는 광신호의 출력을 분석하여 베이스 스테이션의 필요 하드웨어 사양을 예측할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 베이스 스테이션 시스템을 변경하거나 MEMS CCR 을 변경하여 측정 가능 거리를 향상 시킬 방안에 대해 연구하였다. 이외에도 무작위적으로 분포된 센서 노드의 측정 한계 상황을 해결하기 위한 다중 베이스 스테이션 시스템을 제안하였으며 센서 노드 위치 인식 실험을 통해 위에서 언급한 문제 상황을 극복할 뿐만 아니라 위치 인식 성능에서도 효율성을 보임을 검증하였다.

2. 위치 인식 시스템 분석

2.1. ToF 스캐닝 기법의 원리

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

그림 3 은 ToF 스캐닝 기법의 개념, 그림 4 는 구현된 베이스 스테이션을 나타낸다[25-26]. 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 Converter), 시스템을 제어하며

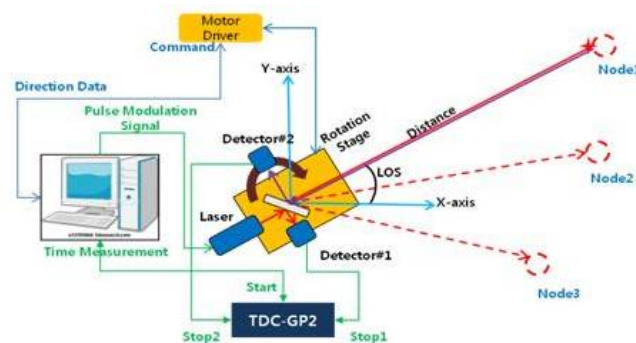


그림 3. ToF 스캐닝 시스템의 개념도

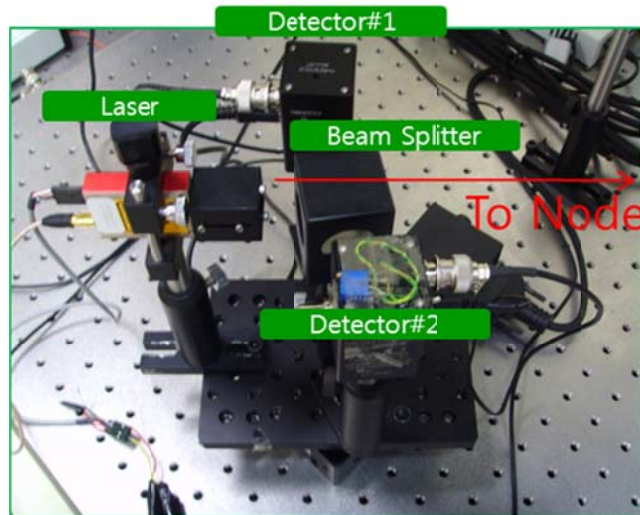


그림 4. ToF 스캐닝 시스템의 실제 사진

데이터를 처리하는 PC 로 구성 된다. 거리 측정에 대한 자세한 설명은 다음과 같다. 펄스 레이저 모듈에서 출발한 광신호는 광 분리기를 거쳐 두 개의 광신호로 분리된다. 이때 하나의 신호는 광 검출기 1 로 향하게 되어 시작 시간이 측정 되고 나머지 신호는 반사체를 포함한 센서 노드를 향해 진행한다. 반사체에 반사되어 돌아온 광신호는 다시 광 분리기를 거치고 광 검출기 2 에 검출됨으로써 종료시간이 측정 되며 그림 5 와 같이 나타낼 수 있다. 이때 측정된 시작 시간과 종료 시간의 차이는 베이스 스테이션과 센서 노드 사이 거리의 두 배에 해당하는 값이므로 식 (2.1)과 같이 $\frac{1}{2}$ 을 곱해서 실제 거리를 계산한다[25].

$$d = \frac{1}{2} \Delta t \times c \quad (2.1)$$

여기서, Δt 는 시작 시간과 종료 시간의 차이, c 는 빛의 속도를 의미한다.

그림 6은 센서 노드에 포함되어 있는 반사체인 MEMS CCR(Corner Cubic Retroreflector)의 개념도와 사진이다[27]. MEMS CCR은 광신호를 입사한 방향의 평행한 방향으로 반사하는 특징을 가지는 초소형 반사체이며 세 반사면이 서로 수직을 이루는 구조의 형태이다.

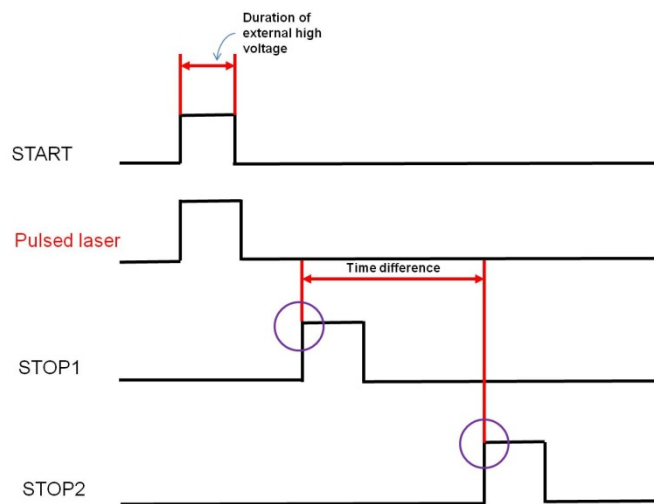


그림 5. ToF의 측정 원리

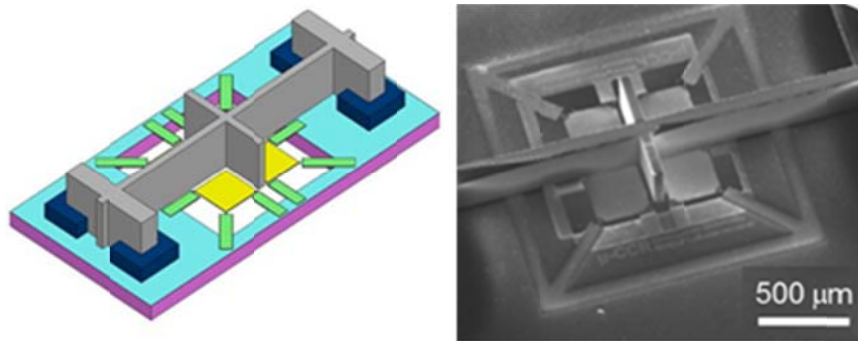


그림 6. MEMS CCR 의 개념도 및 실제 사진

세 반사면이 서로 수직을 이루고 있으므로 MEMS CCR 의 자세와 관계없이 입사한 방향의 평행한 방향으로 빛을 반사할 수 있다. 따라서 주기적으로 펄스 레이저를 발생시키면서 회전하는 베이스 스테이션에서 MEMS CCR 에 반사되어 돌아오는 광신호를 감지하고 이때의 시간차와 회전 각도를 이용하여 센서 노드의 위치를 인식하게 된다.

2.2. 실제 적용에 발생하는 문제점 분석

기존의 연구에서는 MEMS CCR에 반사된 광신호를 검출하기 위해 베이스 스테이션에 그림 7 과 같이 광 검출기 앞에 Collimator를 설치하여[26] 위치 인식을 수행하였다. 이를 통해 반사 광신호를 모을 수 있게 되어 기존의 연구보다 측정 가능 거리는 향상되었지만 그림에도 불구하고 측정 가능 거리는 약 30~40cm 수준으로, 실제 센서 네트워크를 구성하는 것에는 아직 무리가 있다. 또한 이 측정 수치는 실험 장비의 정밀한 배열이 가능한 광 테이블 위에서의 측정 결과이므로 야외 환경에서 위치 인식을 한다면 더욱 측정 거리가 감소하게 될 것이다. 이런 측정 가능 거리가 부족한 점이 실제 센서 네트워크 구성에 가장 큰 문제점이라 할 수 있다.

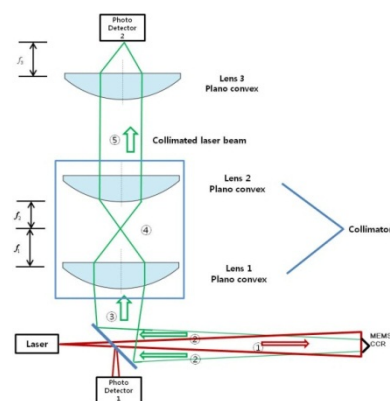


그림 7. 광 검출기 앞에 설치된 Collimator

부족한 측정 가능 거리 이외의 실제 적용에 발생하는 문제점으로 무작위적으로 배치되는 센서 노드를 측정할 수 없는 상황이 발생한다는 것이다. 베이스 스테이션은 광 신호의 직진성을 이용하여 각도 및 거리 정보를 얻는다. 이 때문에 만약 베이스 스테이션과 센서 노드들이 일직선으로 배열되거나 중간에 장애물이 존재하게 된다면 LOS(Line of Sight)가 확보되지 않아 센서 노드의 위치 인식이 불가능하게 된다. LOS 확보의 문제 외에도 MEMS CCR 의 무작위적인 자세에 따른 문제점이 존재한다. MEMS CCR 에 입사되는 광 신호의 방향에 따라 실제 광 신호가 반사되는 면적인 유효 반사 면적이 변하게 되어 반사되는 광신호의 출력이 현저히 감소하게 되므로 베이스 스테이션에서 센서 노드를 감지하지 못하는 상황이 발생할 수 있다.

실제 MEMS CCR을 이용하여 광 신호 기반의 센서 네트워크를 구성하기 위해 발생하는 문제점들을 정리해보면 크게 MEMS CCR을 위치 인식 가능한 거리가 30~40cm로 짧다는 점과 무작위적으로 배치된 센서 노드로 인해 LOS가 확보되지 않아 측정이 불가능한 점이다. 따라서 센서 네트워크를 구성하기 위해선 기존에 사용되는 센서 노드 위치 인식 시스템의 개선이 필요하다.

3. 실제 적용을 위한 시스템 개선 연구

2 장에서 기존의 시스템을 실제 환경에 적용할 때 발생할 수 있는 문제점들에 대해 분석하였다. 본 장에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 측정 거리를 향상 시키기 위한 방안과 LOS 확보의 문제점을 해결하기 위한 방안을 연구한다. 측정 거리를 향상 시키는 방안으로 쉽게 생각할 수 있는 것은 레이저의 출력이나 광 검출기의 민감도를 향상시키는 등의 하드웨어 사양을 향상시키는 것으로 이를 통해 MEMS CCR 에서 반사되어 돌아오는 광 신호를 더 먼 거리에서 측정할 수 있다. 하지만 센서 노드와 베이스 스테이션의 거리에 따라 어느 정도의 하드웨어 사양이 필요한지에 대한 기준이 없으므로 이를 분석하여 기준을 제시할 필요가 있다. 이 외에 측정 거리를 향상 시키는 방안으로 기존의 광 검출기 보다 민감도가 높지만 다른 응답 특성을 가지는 APD(Avalanche Photo Diode)를 광 검출기 대신 사용하는 방법이다. 이 때 APD 의 응답 특성으로 인해 ToF 측정이 가능하지 않기 때문에 기존의 방법 대신 각도 만을 사용하는 위치 인식 기법을 이용해야만 위치 인식이 가능하나 APD 의 사용으로 인해 위치 측정 가능 거리가 기존 광 검출기의 약 5 배 이상 증가한다. 한다.. 베이스 스테이션의 변경 외에도 MEMS CCR 의 변경으로 측정 가능 거리를 향상시킬 수 있다. MEMS CCR 앞에 광 신호를 모아줄 렌즈를 설치하거나 MEMS CCR 을 여러 개 합친 다중 배열 MEMS CCR 을 이용하여 측정 가능

거리가 향상될 것이라 예상할 수 있다. LOS 가 확보되지 않거나 입사 방향에 의해 위치 측정이 불가능한 경우는 단일 베이스 스테이션 대신 다중 베이스 스테이션을 이용하여 다른 방향에서 위치 측정을 함으로써 해결하도록 하였다. 본 장에선 위에서 언급한 여러 방안을 이용하여 실제 적용을 위한 문제점들을 해결하도록 한다.

3.1 절에서는 베이스 스테이션과 MEMS CCR 의 반사 과정에 대해 분석하여 거리에 따른 검출 조건에 대해 분석하고 3.2 절에서는 베이스 스테이션의 변경을 통한 측정 거리 향상 방안을 연구하였다. 3.3 절에서는 3.2 절과는 달리 MEMS CCR 의 변경을 통한 측정 거리 향상 방안을 연구하였다. 3.4 절에는 다중 베이스 스테이션을 구성하여 문제점을 해결하는 방안에 대해 설명하였다.

3.1. 거리에 따른 검출 조건 분석

MEMS CCR 을 이용한 센서 노드 위치 인식 기법은 2 장에서 기술한 것과 같이 반사 광 신호의 세기가 작은 문제점으로 인해 광 검출기에서 위치 인식이 가능한 거리가 매우 짧다. 위치 인식 과정은 그림 8 과 같은 순서로 이루어 진다. 광 검출기#2 가 MEMS CCR 에 반사된 광신호를 검출해야지만 위치 인식이 가능하므로 반사 광신호의 세기가 이 측정 가능 세기를 넘지 못한다면 위치 인식이 되지 못한다. Collimator 를 설치하여 기존보다 약간 측정 거리가 향상된 현재의 시스템은 ToF 기법이 아닌 다른 기법으로 변경하지 않는 한 구조 면에서 개선할 여지가 없다고 판단되었기에, 위치

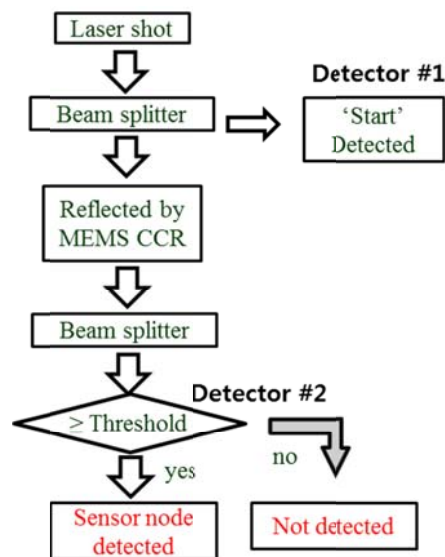


그림 8. 베이스 스테이션의 센서 노드 검출 조건

인식 가능 거리를 향상시키기 위해 시스템을 이루고 있는 레이저의 출력이나 광 검출기의 민감도를 올리는 등 하드웨어적으로 시스템을 향상시키거나 반사체인 MEMS CCR 에 보조 기구를 설치하는 등의 방안을 선택하였다. 하지만 베이스 스테이션의 하드웨어를 향상 시키려고 할 때 어느 정도의 하드웨어 사양이 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 거리에 따른 MEMS CCR 의 검출 조건을 확인하였다.

3.1.1. 입사 광 신호의 광 밀도

베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 거리가 멀어질 수록 입사 광 신호의 퍼짐에 의해 센서 노드의 MEMS CCR 에 도달할 때의 광 신호 면적이 증가하므로, 입사 광 신호의 퍼짐 각과 센서 노드 사이의 거리는 반사 광 신호의 세기에 많은 관련이 있다. 따라서 반사 광 신호의 세기를 계산하기 위해선 먼저 입사 광 신호 면적에 대한 분석이 수행되어야 한다. 레이저 모듈에서 출발한 입사 광 신호는 퍼짐 각에 의해 그림 9 의 적색과 같이 면적을 가진 상태로 MEMS CCR 에 도달하게 된다. MEMS CCR 은 세면이 서로 수직을 이루는 구조이므로 광 신호의 입사 방향의 반대 방향으로 광 신호를 반사하게 되고 광 신호는 MEMS CCR 표면의 불균일성 및 오차 때문에 그림 9 의 녹색과 같이 입사 때보다 더 큰 퍼짐각을 가진 채 반사된다. 광 분리기를 거친 광 신호는 2 장에서 언급한 collimator 를 통해 한 점으로 모여 최종적으로 광 검출기의 수신 부에 도달하게 된다. 그림 10 에서 볼 수 있듯이 레이저 모듈에서 나온 입사 광 신호의 초기 반지름을 r , 퍼짐 각을 θ_i 라고 하면 거리 d 만큼 떨어져 있는 MEMS CCR 에 도달하는 광 신호의 면적은 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

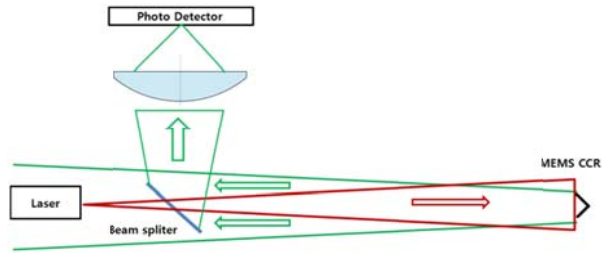


그림 9. 거리에 따른 광 신호의 면적

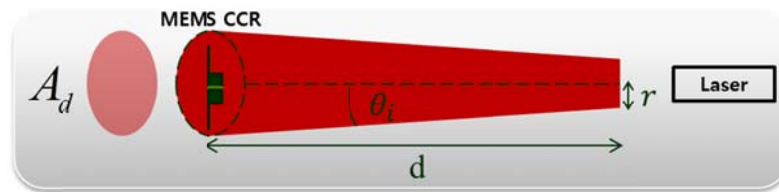


그림 10. 입사 광 신호의 퍼짐 각과 면적

$$A_d = \pi(r + d \tan \theta_i)^2 \quad (3.1)$$

이 면적으로 레이저 모듈에서 나온 입사 광 신호의 세기 P_i 를 나누면 식 (3.2)와 같이 MEMS CCR 에 도달했을 때의 광 밀도를 구할 수 있다.

$$I_i = \frac{P_i}{\pi(r + d \tan \theta_i)^2} \quad (3.2)$$

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

3.1.2. 유효 반사 면적

MEMS CCR 에 입사하는 광 신호의 방향이 그림 11 와 같이 $-\hat{n}_i$ 벡터 방향이라 할 경우, 반사되는 방향은 \hat{n}_r 벡터 방향이고 이 입사 벡터 값에 따라 MEMS CCR 의 유효 반사 면적이 달라지게 된다[15, 16]. 퍼진 입사 광 신호의 면적은 MEMS CCR 보다 훨씬 크므로, MEMS CCR 이 퍼진 광 신호를 벗어나지 않는다는 가정 하에 유효 반사 면적은 입사 광 신호의 벡터를 법선 벡터로 하는 평면에 MEMS CCR 을 정사영으로 내린 넓이와 같다. 이는 입사 광 신호의 방향 벡터 크기를 1 로 가지는 단위 벡터로 나타낸 후 이 벡터의 x, y, z 성분을 더한 것에 MEMS CCR 의 한 면의 넓이를 곱한 것으로 나타낼 수 있다[27]. 정사영의 넓이 또는 벡터 성분의

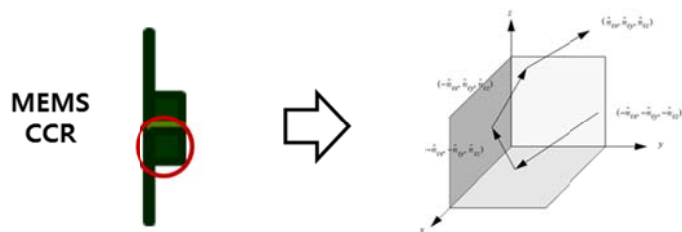


그림 11. MEMS CCR 에 입사하는 광 신호의 방향

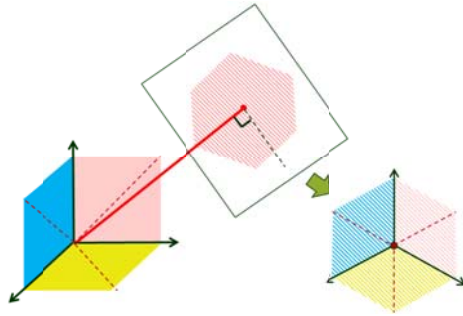


그림 12. MEMS CCR 의 최대 유효 반사 면적

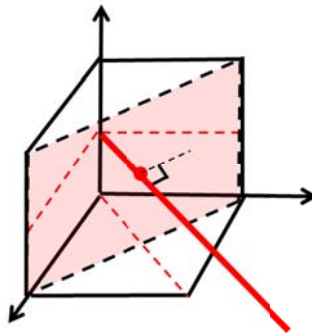


그림 13. 실험 환경에서의 최대 유효 반사 면적

합을 생각해 본다면 가장 큰 유효 반사 면적을 갖는 입사 광 신호의 방향 벡터는 $(1, 1, 1)/\sqrt{3}$ 로, 그림 12 를 보면 방향 벡터를 법선 벡터로 하는 평면에 MEMS CCR 을 정사영으로 내린 모습과 정사영의 넓이를 알 수 있다. 이를 통해 MEMS CCR 의 한 면의 넓이가 A, 총 넓이가 3A 일 때 최대 유효 반사 면적은 $A\sqrt{3}$ 임을 알 수 있다.

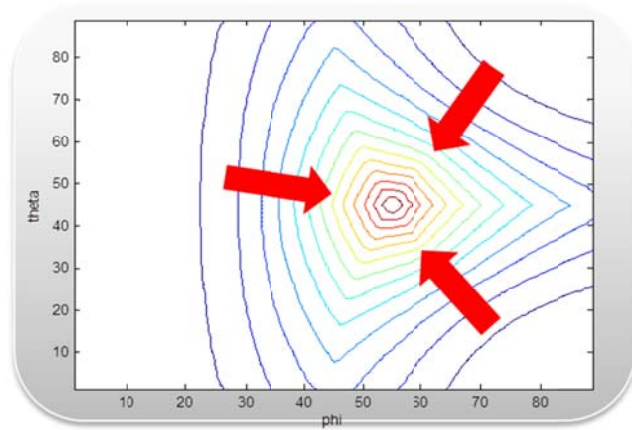


그림 14. 입사각에 따른 유효 반사 면적

하지만 실험에서의 MEMS CCR 은 2 차원적인 스캐닝을 위해 기울어지지 않고 똑바로 놓여져 있으므로 입사 광 신호의 방향 벡터는 3 차원 x, y, z 가 아닌 2 차원 x, y 만이 가능하다. 이를 고려한다면 최대 유효 반사 면적을 갖는 입사 광 신호의 방향 벡터는 그림 13 에서 볼 수 있듯이 $(-1, -1)/\sqrt{2}$ 이 되고 실험에서 얻어지는 최대 유효 반사 면적은 $A\sqrt{2}$ 가 된다.

3.1.3. 반사율

정확한 반사 광 신호 세기를 계산하기 위해선 MEMS CCR 에서 광 신호가 반사될 때 MEMS CCR 의 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 CCR 의 개체에 따른 오차와 세 면의 비 정렬 오차 등을 고려하여 이상 계수(ideal factor) a 를 도입한다. MEMS CCR 의 한 면의 반사율을 0.8 로 놓고 반사 횟수를 고려해보면 최대 유효 반사 면적을 구할 때와 같이 MEMS CCR 이 2 차원 적으로 놓여있으므로 반사면은 세 면이 아니라 두 면이 된다. 결국 실험 환경에서의 MEMS CCR 의 반사율은 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{CCR} = 0.64a^2 \quad (3.3)$$

만약 MEMS CCR 에 입사하는 광 신호의 방향이 그림 11 와 같이 3 차원이라면 반사면은 세 면이 되므로 반사율은 $0.8a$ 의 세제곱인 $0.512a^3$ 이 되었을 것이다. 2 차원인지 3 차원인지에 따라 유효 반사 면적과 반사율의 식이 달라지므로 이를 각기 표시하지 않고 하나의 인자로 표시하도록 한다. 실험환경인 2 차원 상의 최대 유효 반사 면적과 반사면에 의한 반사율을 곱한 식을 R_{CCR} 이라 정의하였다.

$$R_{CCR} = 0.64a^2 \cdot A\sqrt{2} \quad (3.4)$$

3.1.4. 광 분리기

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

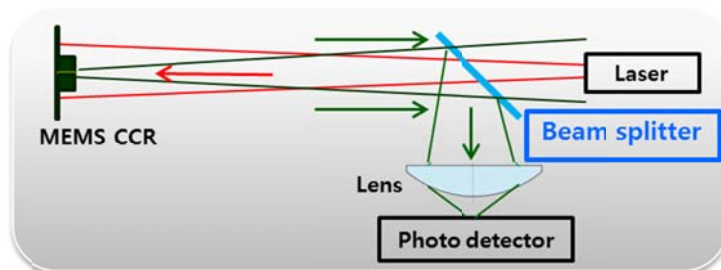


그림 15. 광 분리기

3.1.5. 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 (3.5)와 같다.

$$P_{re} = \frac{P_i \cdot R_{CCR}}{5\pi(r + d \tan \theta_i)^2} \quad (3.5)$$

식 (5)의 각 파라미터에 실제 수치[26-27]를 대입하고 이를 통해 거리와 세기에 관한 예상 그래프를 그려 실제 반사 광 신호 세기와 비교하여 본다.

표 2. 베이스 스테이션의 변수

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

3.1.6. 이론 식과 측정치의 비교

위에서 구한 거리에 따른 반사 광 신호 세기에 대한 이론 식을 검증하기 위해 그림 15 과 같은 시스템 구조에서 검출기 대신 파워 미터를 설치하고 거리가 늘어남에 따라 최대 반사 광 신호 세기가 어떻게 되는지를 반복 실험하여 측정된 후 평균을 구하였다. 이 때의 베이스 스테이션 설정을 표 1 에 정리하였다. 그 후 위의 이론 식에서 수치를 알 수 없는 이상 계수를 구하기 위해 실제 측정된 값과 비교하여 이상 계수를 구하였다. 이상 계수가 약 0.9 일 때 그림 16 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 16 에서는 실험 환경의 거리 한계로 인해 볼 수 없었던 세기와 거리의 반비례 관계의 모습을 렌즈를 통해 퍼짐 각을 15 mrad 로 증가시키자 그림 16 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.

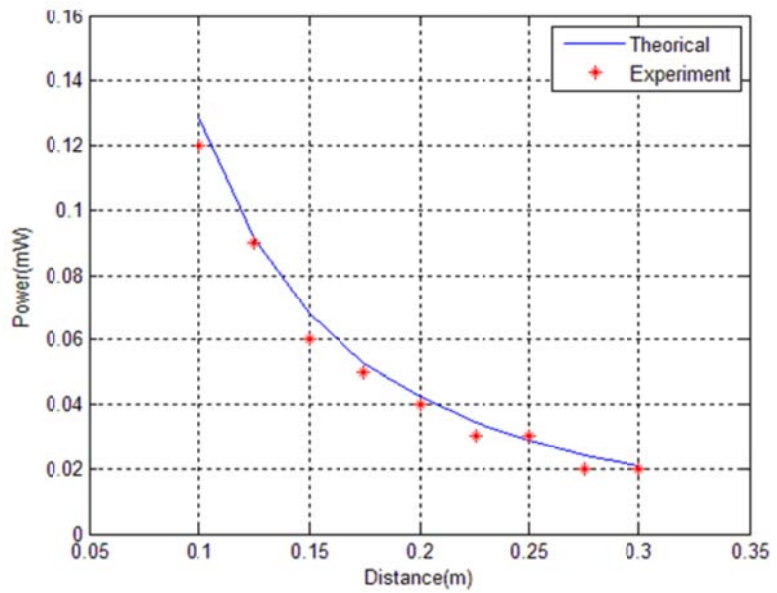
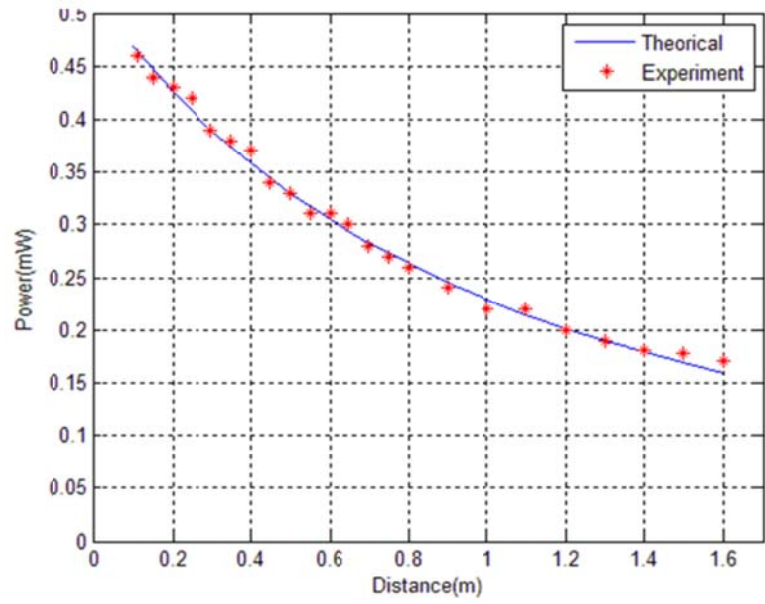


그림 16. 반사 광 신호 측정 값과 이론 값의 비교

3.1.7. 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 mW 이고 현재의 하드웨어를 그대로 사용한다면 약 40 cm 정도까지 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 50 μW 인 광 검출기로 교체한다면 위치 인식 가능 거리가 약 2 m 까지 증가하게 된다. 위의 분석을 통해 광

표 3. 거리에 따라 필요한 레이저의 출력

거 리	5m	10m	20m
검출에 필요한 레이저 출력	1.08W	3.18W	10.58W
기존 레이저 출력에 대한 배수	8.3 배	24.5 배	81.4 배

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. 표 2 에서 볼 수 있듯이 일정 거리까지 위치 인식이 가능하도록 시스템을 세팅하고 싶다면, 레이저의 출력을 표에 나온 대로 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.

3.2. 베이스 스테이션의 변경을 통한 성능 향상

3.1 절과 달리 기존의 위치 인식 시스템의 구조를 변경하여 성능을 향상시키는 방안을 연구한다. 현재 쓰고 있는 광 검출기는 일정 이상의 세기를 가지는 광 신호가 들어오면 TTL 레벨의 전기 신호를 출력하여 TDC 에서 이를 측정해 ToF 를 측정하게 된다. 만약 광 검출기를 3.1 절에도 언급했던 APD 로 변경해 사용하게 된다면 측정 거리는 몇 배로 늘어나게 되지만 TTL 출력을 내보내지 못하므로 ToF 를 측정하지 못하게 된다. 이로 인해 기존에 사용하던 ToF 스캐닝 기법 대신 각도 만을 이용한 다른 위치 인식 기법을 사용해야만 위치 인식이 가능해 진다.



그림 17. APD 의 실제 모습

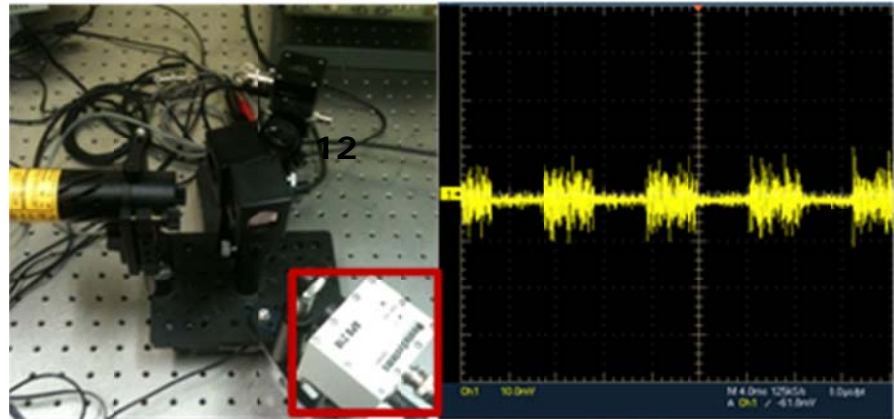


그림 18. 반사 광 신호 측정 값과 이론 값의 비교

그림 에서 볼 수 있듯이 APD 의 민감도는 기존의 광 검출기보다 뛰어나기 때문에 약 1.7m 의 거리에서도 MEMS CCR 에서 반사된 광 신호를 검출할 수 있다. APD 의 출력은 그림 에서 보듯이 광 신호의 세기에 비례하는 진폭을 가진 진동하는 아날로그 신호를 출력한다. 레이저의 출력을 조정하여 수 Hz 로 깜박이게 한다면 그림과 같이 광 신호가 검출될 때와 검출되지 않을 때의 출력 양상을 알 수 있다. 이 때 1.7m 의 거리에서 인식이 가능하다는 것은 현재 실험 장치가 놓인 광 테이블의 크기 제한으로 인해 최대 1.7m 의 거리까지만 위치 인식 실험을 할 수 있었던 것이고 3.1 절의 거리에 따른 반사 광 신호 세기나 그림의 APD 출력을 봤을 때 충분히 2m 이상에서도 측정이 가능하다. 광 신호의 유무를 검출할 때는 광 신호가 들어올 때와 들어오지 않을 때의 출력 전압의

크기를 보고 임계값의 크기를 정해 이를 넘느냐 넘지 않느냐로 광 신호를 검출할 수 있다. 이렇게 APD 를 사용할 때는 ToF 를 측정할 수 없지만 베이스 스테이션의 회전과 광 신호가 반사되어 돌아올 때의 각 정보를 통해 베이스 스테이션과 센서 노드 사이의 각 정보를 획득할 수 있다. 기존의 ToF 스캐닝 기법과 다르게 각 정보만을 이용하여 위치 인식을 한다면 APD 로 MEMS CCR 을 위치 인식할 수 있다.

3.2.1. AoA 위치 인식 기법

각도만을 이용한 위치 인식 방법으로 생각할 수 있는 것은 그림 와 같이 두 베이스 스테이션의 거리를 알 때 각 베이스 스테이션의 각도 정보를 통해 삼각형을 그려 위치 인식을 하는 AoA 위치 인식 기법이다. AoA는 방향각을 이용하여 센서노드의 위치를 측정하는 기법으로 베이스 스테이션에서 센서노드가 송신하는 신호의 방향각을 측정하는 기법이다. 각 베이스 스테이션과 센서노드 사이 시선각이 만나는 점을 삼각함수를 이용해 계산하여 센서노드의 위치를 추정하는 기법이며 이것은 식 (2.3)에 잘 나타나있다[7-9].

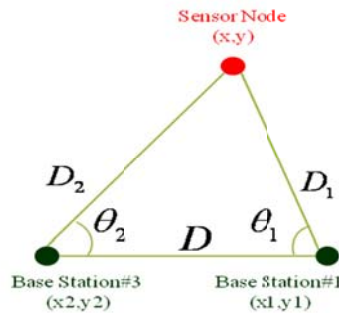


그림 19. AoA 위치 결정 기법

$$\frac{D}{\sin(\pi - (\theta_1 + \theta_2))} = \frac{D_1}{\sin \theta_1} = \frac{D_2}{\sin \theta_2} \quad (2.3)$$

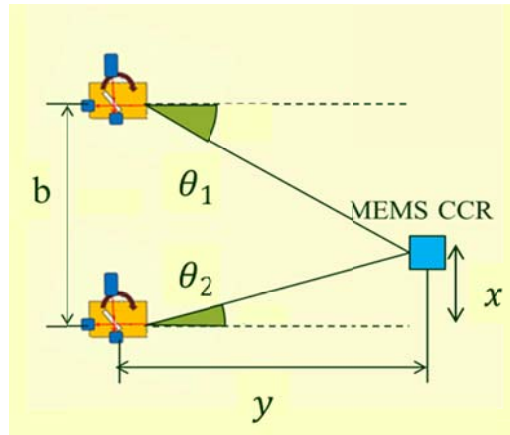


그림 20. AoA를 이용한 센서노드 위치 결정기법

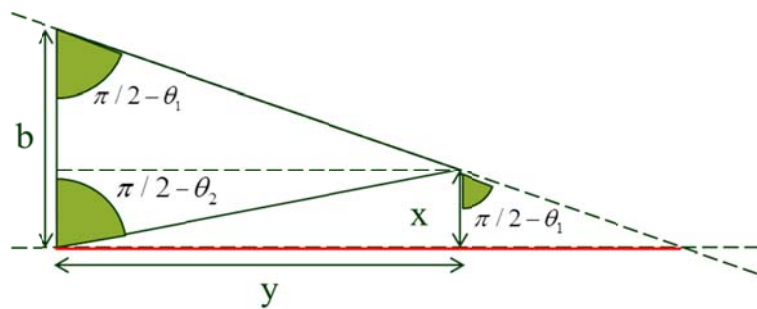


그림 21. AoA를 이용한 센서노드 위치 계산

그림 20에 나타난 것처럼 센서노드의 위치를 측정하기 위해서는 최소 2개 이상의 방향각 측정치를 필요로 하며 이들을 교차시켜 센서노드의 위치를 결정할 수 있다. 하지만 센서노드와 베이스 스테이션의 거리가 가깝거나 주변환경에 의한 신호산란이 발생하는 경우 센서노드 위치측정에 부정확한 경향이 나타난다. 이처럼 AoA 위치 인식을 하기 위해선 기존의

단일 베이스 스테이션이 아닌 다중 베이스 스테이션이 필요함을 알 수 있다. ToF스캐닝 기법은 각 베이스 스테이션이 독립적으로 센서 노드를 위치 인식이 가능하지만 AoA 위치 인식 기법은 적어도 2개 이상의 베이스 스테이션에서 센서 노드를 인식해야지만 위치 인식이 된다는 단점이 존재한다. 하지만 후의 내용에서 다루겠지만 실제 센서 네트워크를 구성하기 위해선 다중 베이스 스테이션이 필수적이므로 5배 이상 측정 가능 거리가 향상되는 AoA 위치 인식 기법을 쓰는 것이 단점을 극복할 정도의 장점을 가지고 있다고 할 수 있다.

3.2.2. Lighthouse 위치 인식 기법

각도만을 이용하여 위치 인식을 하는 AoA 위치 인식 기법을 변형하여 다음 그림 22 와 같은 Lighthouse 기법을 생각할 수 있다[28]. 이는 AoA 위치 인식 기법에서 적어도 2개 이상의 베이스 스테이션이 필요하다는 단점을 극복하기 위한 기법으로 한 베이스 스테이션에 레이저 2개를 설치하고, 하나의 센서 노드에 대해 각각의 레이저가 도달할 때의 베이스 스테이션의 회전각을 기록해 두 회전각의 차이를 이용하여 계산하는 방법이다.

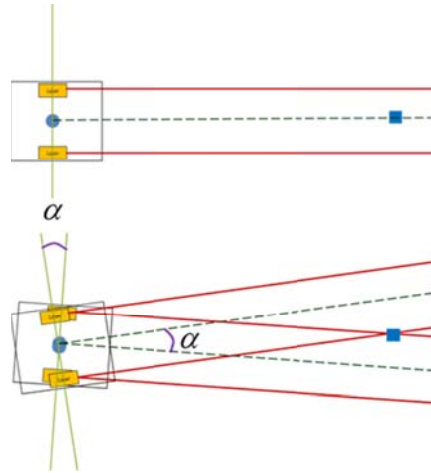


그림 22. Lighthouse 기법을 이용한 센서노드 위치 결정

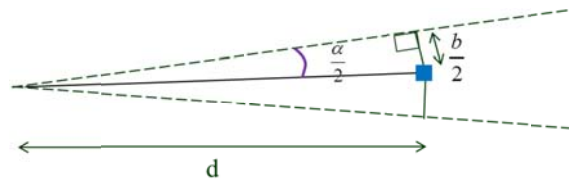


그림 23. Lighthouse 기법을 이용한 센서노드 위치 계산

이 기법은 AoA 위치 인식 기법과 거의 동일하나 베이스 스테이션의 부품 중에서 상대적으로 값이 저렴한 레이저를 하나 더 설치해 2대의 베이스 스테이션이 있는 효과를 내므로 가격 면에서 효율적이라 할 수 있다. 또한 후에 다룰 내용이지만 일직선으로 배열된 센서 노드의 위치 인식에서도 Lighthouse 기법은 레이저가 한 점에 고정되어 회전하는 것이 아닌, 회전하면서 고정된 점 또한 변하기 때문에 일직선으로 배열된 센서 노드도 위치 인식이 가능하다.

3.2.3. 위치 인식 기법의 성능 비교

위에서 설명한 AoA 위치 인식 기법과 Lighthouse 위치 인식 기법의 성능 및 170cm 까지 위치 인식이 가능한지를 확인하기 위해 다음 그림과 같이 MEMS CCR 을 (130cm, 0), (170cm, 0)에 위치 하여 위치 인식을 수행하였다.

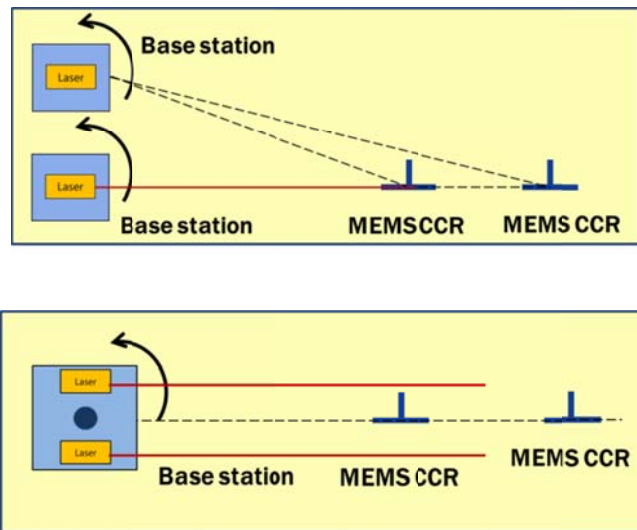


그림 24. AoA 및 Lighthouse 기법을 이용한 위치 인식 실험

표 4. 센서노드 위치 인식 결과

	Node 1	Node2
True position	130cm	170cm
Average error (Multiple)	2.94cm	1.62cm
Average error (Lighthouse)	2.61cm	2.56cm

표 의 결과를 보면 알 수 있듯이 약 2.6cm 이하의 오차를 가지고 170cm 의 위치에 있는 MEMS CCR 을 위치 인식 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 오차의 크기는 베이스 스테이션을 설치할 때의 배열오차로 인한 것으로 보이며, 설치할 때의 각도나 자세를 정밀하게 잡아줄 수 있는 레퍼런스를 사용한다면 오차가 줄어들 것이라 예상할 수 있다. 결론적으로 기존의 광 검출기가 아닌, APD 를 이용하기 위해 기존의 ToF 스캐닝 기법이 아닌 AoA 위치 인식 기법과 Lighthouse 기법을 사용하였다. 이를 통해 기존의 30~40cm 의 측정 가능 거리에서 약 170cm 로 4 배 이상 측정 가능 거리가 향상 되었다.

3.3. MEMS CCR 의 변경을 통한 성능 향상

현재 실험에 사용하고 있는 MEMS CCR 은 방위사업청/국방과학연구소 지정 국방 MEMS 특화연구센터에서 개발된 것으로 이를 반사체로 사용해 광 신호 기반의 센서 네트워크를 구성하는 연구를 진행하고 있다. 이 때문에 MEMS CCR 의 크기나 구조를 변경할 수 없기 때문에 주변에 보조적인 장치를 설치하거나 MEMS CCR 의 변경을 시뮬레이션 하는 것으로 성능을 향상시킬 수 있다.

MEMS CCR 주변에 보조 장치를 설치하는 방안으로 생각할 수 있는 것은 다음 그림과 같이 MEMS CCR 앞에 렌즈를 설치하는 방법이다. 3.1 절에서 설명했듯이 광 신호는 거리가 증가될수록 퍼짐 각에 의해 광 신호가 퍼지게 되고 이로 인해 광 신호의 일부만이 MEMS CCR 에 반사되게 된다. 렌즈를 MEMS CCR 앞에 설치하게 된다면 퍼지는 광 신호를 한 점으로

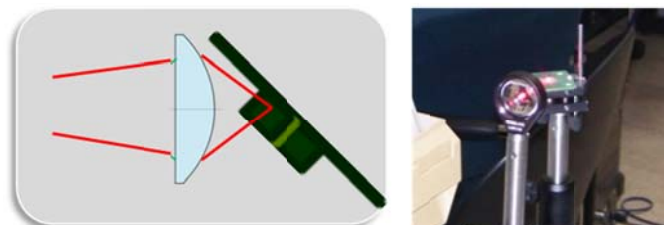


그림 25. MEMS CCR 앞에 설치한 렌즈

모을 수 있게 된다. 한 점으로 모이는 초점거리에 MEMS CCR 의 반사면이 위치하게 된다면 MEMS CCR 의 한 면 보다 작은 크기로 광 신호가 모여 반사되므로 유효 반사 면적이나 광 밀도 등을 고려할 필요 없이 MEMS CCR 의 반사율과 광 분리기로 인한 손실만이 발생하기 때문에 광 신호의 손실이 비약적으로 줄어들게 된다. 실제 실험을 통해 확인한 결과 기존의 광 검출기로도 광 테이블 위에서의 측정 한계 거리인 1.7m 을 충분히 측정 가능하였다.

이 외에 MEMS CCR 의 변경을 고려한다면 현재의 MEMS CCR 을 여러 개 겹쳐 만든 다중 배열 MEMS CCR 을 생각할 수 있다. 현재 센서 노드의 반사체로 측정하는 것은 MEMS CCR 하나이다. 이를 다음 그림 26 와 같이 여러 개 배열한다면 반사 면적이 증가하기 때문에 측정 가능 거리가 증가하게 된다. 다음 그림 27 은 기존의 MEMS CCR 의 거리에 따른 반사 광 신호 세기와 MEMS CCR 4 개를 합쳐 만들었다고 가정한 다중 배열 MEMS CCR 의 거리에 따른 반사 광 신호 세기의 비교이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 기존 광 검출기의 최소 측정 가능 세기인 0.4mW 로도 2m 이상 위치 인식이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

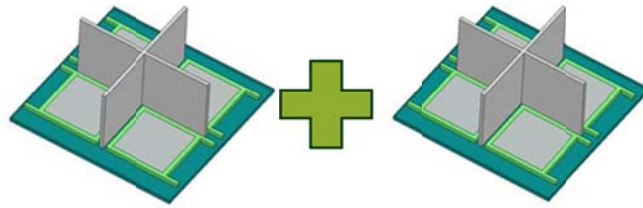


그림 26. 다중 배열 MEMS CCR

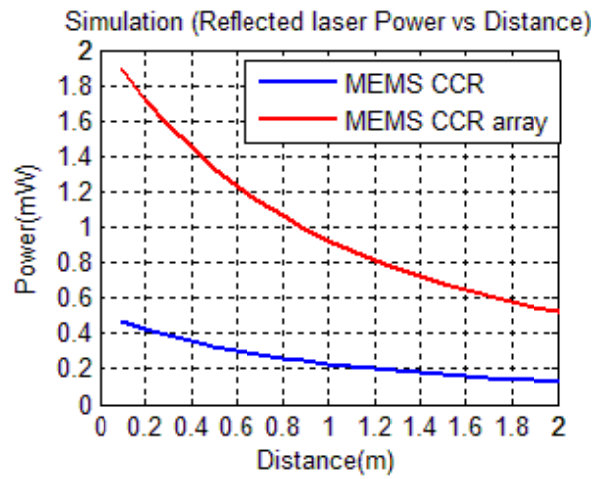


그림 27. MEMS CCR 과 다중 배열 MEMS CCR 의 비교

3.4. 다중 베이스 스테이션 구성

실제 센서 네트워크를 구성할 때 센서 노드들은 베이스 스테이션 주변에 무작위적으로 뿌려지게 된다. 이 때 발생할 수 있는 문제점은 무작위적으로 뿌려진 센서 노드가 그림 28 과 같이 베이스 스테이션과 일직선 위에 위치하고 있거나 센서 노드와 베이스 스테이션 사이에 장애물이 있어 LOS 가 확보 되지 않는 상황이다. 이 외에 3.1 절에서 설명했던 입사각에 의한 유효 반사 면적의 변화로 인해 측정 가능 거리 안에 센서 노드가 존재하더라도 반사 세기가 충분하지 않아 측정이 되지 않는 문제점이 존재한다. 이런 문제점은 기존 시스템이 단일 베이스 스테이션이기 때문에 가지는 한계성으로, 단일 베이스 스테이션이 아닌 다중 베이스 스테이션으로 위치 인식 시스템을 변경한다면 해결 가능한 문제이다.

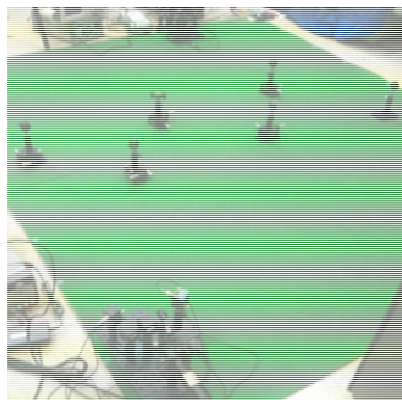


그림 28. 무작위적으로 위치한 센서 노드

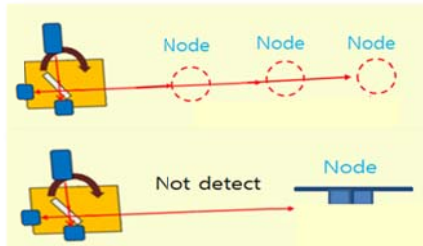


그림 29. 위치 인식이 불가능한 상황

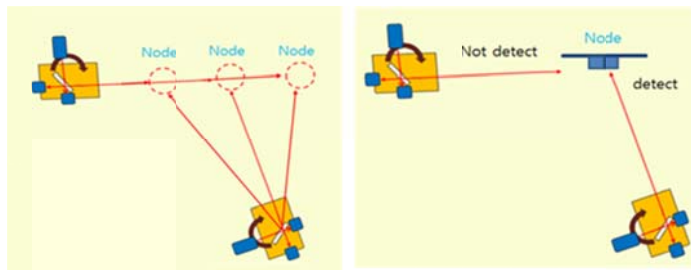


그림 30. 다중 베이스 스테이션을 통한 해결

이런 문제점은 기존 시스템이 단일 베이스 스테이션이기 때문에 가지는 한계성으로, 이를 해결하기 위해 다중 베이스 스테이션 시스템으로 위치 인식 시스템을 변경한다면 다음 와 같이 일직선으로 배열된 센서 노드들은 다른 방향의 베이스 스테이션이 위치 인식함으로 해결이 가능하고 입사 방향에 의한 반사 광신호 세기의 감소의 문제점도 한쪽 방향에선 광신호의 세기가 적어 센서 노드 검출이 불가능하더라도 다른 베이스 스테이션에서 다른 방향으로 센서 노드를 스캐닝 함으로써 유효 반사 면적과 광신호의 반사 세기가 변화, 센서 노드의 위치 인식이 가능하게 된다.

4. 위치 인식 실험 및 결과 분석

3 장에서는 실제 센서 네트워크를 구성하는데 기존 위치 인식 시스템이 가지는 문제점을 분석하였고 이에 대한 방안을 연구하였다. 측정 거리가 짧은 문제점과 무작위적으로 배치되는 센서 노드의 문제점을 고려해볼 때 두 가지 문제점을 해결 가능한 것은 다중 베이스 스테이션 시스템을 구성하는 것이다. 다중 베이스 스테이션을 구성함으로써 기존의 ToF 기법 외에 다른 위치 인식 기법인 AoA 위치 인식 기법이 사용 가능해지고 APD 를 사용 가능하게 됨으로써 측정 가능 거리를 향상시킬 수 있다. 또한 무작위적으로 배치되는 센서 노드의 문제점도 해결 가능하다. 결론적으로 다중 베이스 스테이션이 센서 네트워크를 구성하는데 가장 적합한 위치 인식 시스템이라 할 수 있다. 4 장에서는 3 장의 내용을 바탕으로 결정된 다중 베이스 스테이션의 위치 인식 성능을 확인한다. 다중 베이스 스테이션의 위치 인식 가능 거리에 대한 실험은 3 장에서 이미 진행했으므로 정확한 위치 레퍼런스를 바탕으로 베이스 스테이션 배열 오차를 최소로 하여 기존의 ToF 스캐닝 기법과 다중 베이스 스테이션 시스템의 위치 정확도를 비교해본다..

4.1. 실험 조건

실험에 사용된 베이스 스테이션의 사양은 표 5 와 같다. 기존 ToF 스캐닝 기법과의 비교를 위해 기존 베이스 스테이션의 사양을 그대로 사용하였고 이를 다중 베이스 스테이션으로 하나 더 추가하였다. MEMS CCR은 기존의 시스템으로 측정하기엔 다중 베이스 스테이션을 꾸미기 힘들 정도로 짧기 때문에 대신 상용 CCR을 사용하여 다음 그림 31 과 같이 배열 후 실험을 진행하였다. 이 때 베이스 스테이션의 배열 및 자세 오차를 최소화하고 센서 노드 및 베이스 스테이션의 위치 참 값을 알기 위해 사용한 것은 Vicon 카메라 시스템이다. 이를 통해 다음 그림 32 처럼 광 테이블이 아닌 야외 환경을 가정하여 꾸민 실험 공간에서도 정확한 위치 레퍼런스를 구할 수 있었고 배열 오차 또한 최소한으로 할 수 있었다.

표 5. 베이스 스테이션에 사용된 하드웨어

Rotation stage	URS150BCC, 0.1 deg resolution
Time to digital convertor	ATMD-GP2, 1.5cm RMSE
Laser module	LQD660D, 660 nm, 130mW, modulation up to 100Mhz
Photo detector	818-BB-21TTL

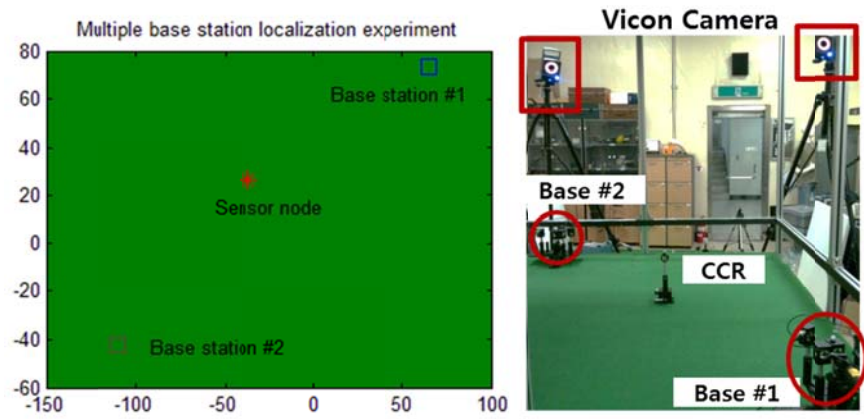


그림 33. 다중 베이스 스테이션 위치 인식 실험 환경

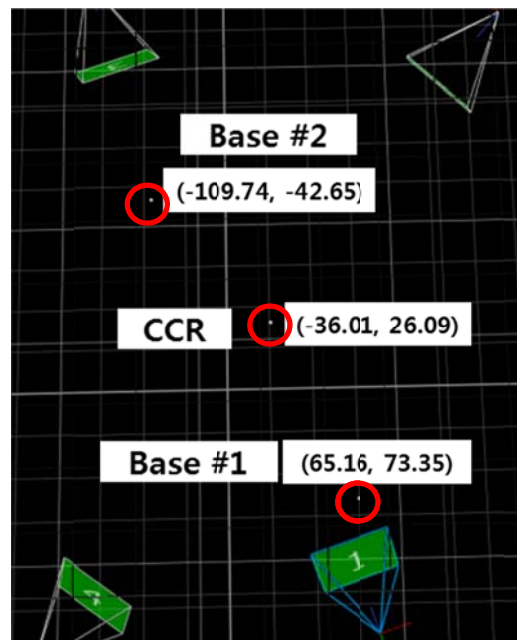


그림 32. Vicon 카메라를 통한 위치 레퍼런스 획득

4.2. 실험 결과 분석

실험은 두 베이스 스테이션에서 하나의 상용 CCR 의 위치를 각 정보와 거리 정보를 구한 뒤 각 정보와 거리 정보를 통해선 기존의 ToF 스캐닝 기법처럼 위치 인식을 하고, 각 정보만을 이용하여 AoA 위치 인식을 수행하였다. ToF 위치 인식 결과와 AoA 위치 인식 결과는 다음 그림 33 과 같이 정리하였다. 녹색, 청색, 적색으로 각 베이스 스테이션에서의 ToF 결과와 AoA 결과를 표시하였다.

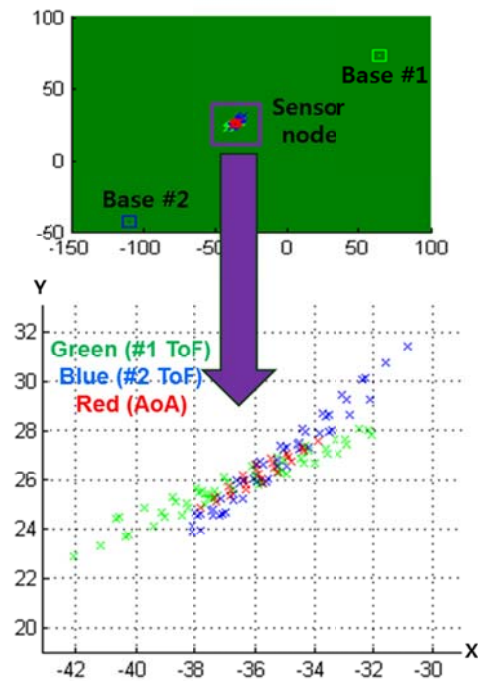


그림 33. 위치 인식 실험 결과

상용 CCR 의 지름은 약 2cm 로 표 에 나온 것 처럼 베이스 스테이션의 회전 각은 0.1deg 이기 때문에 동일한 CCR 이 여러 각도에서 측정되었다. 스캐닝된 각도를 정리하자면 베이스 스테이션#1 은 24.8~25.2deg 까지 0.1deg 단위로 상용 CCR 을 검출 가능하였고 베이스 스테이션#2 는 42.8~43.2deg 까지 검출이 되었다. 각도 및 거리에 따라 ToF 결과를 정리한 그림은 다음과 같다.

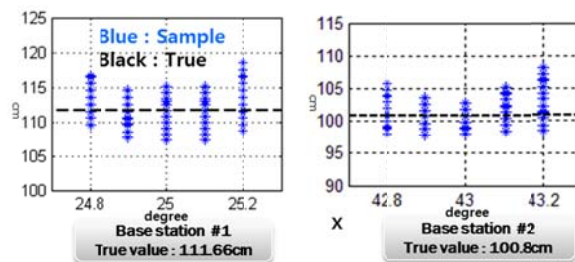


그림 34. 각도와 거리로 정리한 ToF 위치 인식 결과

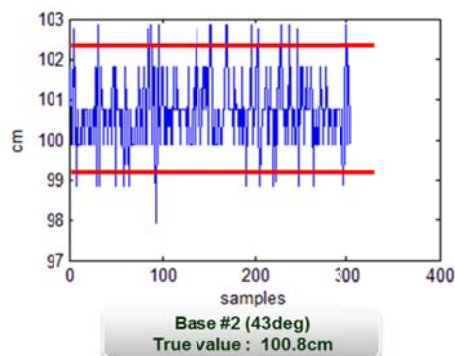


그림 35. ToF 위치 인식 결과의 후처리

표 6. 다중 베이스 스테이션의 위치 인식 결과 비교

	Sensor Node	Position Error
True position	(-36.01, 26.09)	-
Base station #1	(-36.32, 26.69)	0.68cm
Base station #2	(-35.36, 26.78)	0.95cm
AoA (average)	(-35.86, 26.24)	0.21cm

이 후 기존의 ToF 스캐닝 기법과 마찬가지로 표 6 에 나와있는 ATMD - GP2 의 1.5cm RMSE 를 이용하여 위치 측정된 결과의 이상 신호를 제거한다. AoA 측정 결과는 따로 후처리 할 조건이 없으므로 측정치들의 평균을 이용하였다. ToF 및 AoA 의 후처리 후 결과는 다음 표 와 같다. 표 6 을 살펴보면 ToF 기법 및 AoA 기법의 오차가 1cm 미만인 것을 볼 수 있으며 AoA 기법이 약 0.5cm 정도 오차가 적음을 확인할 수 있다. AoA 위치 인식 기법은 두 베이스 스테이션이 측정한 각도만을 이용하고 ToF 스캐닝 기법은 이 각도에 거리 정보를 섞어서 위치 인식을 하게 되므로 그림 처럼 두 ToF 스캐닝 기법의 위치 인식 범위의 교집합이 AoA 위치

인식 기법의 범위처럼 나오게 되어 결과적으로 오차의 범위가 ToF 기법보다 더 적고 이로 인해 오차의 크기가 더 작게 됨을 알 수 있다. 일반적으로 생각해 봤을 때 AoA 기법은 장거리를 측정할 때 약간의 각도 오차 만으로도 큰 오차가 발생하므로 ToF 위치 인식 기법보다 오차가 클 것이라 생각되지만, 현재 사용하는 ToF 위치 인식 기법은 AoA 위치 인식 기법과 각도 정보를 동일하게 사용하므로 각도 오차 또한 ToF 위치 인식 결과에 영향을 미치게 된다. 각도 오차를 가정하더라도 AoA 위치 인식 결과는 두 ToF 위치 인식 결과의 교집합과 같이 나오므로 결국 AoA 위치 인식 기법이 ToF 위치 인식 기법보다 더 나은 위치 인식 정확도를 보인다는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 MEMS CCR 을 이용한 광신호 기반의 무선 센서 네트워크의 센서 노드 위치 인식에서 실제 센서 네트워크를 구성하는데 발생하는 문제점과 이에 대한 해결 방안에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 광학 실험에서 사용되는 센티 미터급의 CCR 이 아닌 마이크로 미터 크기의 CCR 을 사용하고 실제 센서 네트워크 상황을 가정하여 이 때 발생하는 현상과 극복해야 할 문제들을 분석하였다.

먼저 실제 센서 네트워크를 구성하는데 발생하는 문제점으로 기존의 위치 인식 시스템이 MEMS CCR 을 측정할 때 측정 가능 거리가 약 30~40cm 밖에 되지 않는다는 점을 뽑았다. 측정 가능 거리가 짧은 문제점은 단순히 베이스 스테이션의 레이저 출력과 광 검출기의 민감도를 향상 시킴으로써 해결할 수 있지만 거리에 따라 어느 정도의 하드웨어 사양이 필요한지 기준이 없기 때문에 이를 제시하고자 베이스 스테이션의 검출 조건을 분석하여 거리에 따라 필요한 베이스 스테이션의 하드웨어 사양의 기준을 제시하였다. 이 후 기존의 광 검출기와 다른 응답 특성을 가지며 민감도가 높은 APD 를 광 검출기로 활용하기 위해 ToF 정보 없이도 위치 인식이 가능한 AoA 위치 인식 기법과 이를 변경한 Lighthouse 위치 인식 기법을 제안하였고 두 기법을 실제 실험에 사용하여 MEMS

CCR 을 1.7m 이상 위치 인식이 가능하다는 것을 확인하였다. 베이스 스테이션의 변경 외에 측정 가능 거리를 향상 시킬 방안으로 MEMS CCR 의 변경을 제안하였다. MEMS CCR 앞에 렌즈를 설치하여 광 신호의 퍼짐과 유효 반사 면적에 의해 감소하는 광 신호의 손실을 제거함으로써 기존의 광 검출기로도 1.7m 이상의 위치 인식이 가능하다는 것을 보였다. 렌즈 이외에도 MEMS CCR 을 여러 개 배열한 다중 배열 MEMS CCR 을 제안하였지만 이를 실제로 제작하지는 못하기 때문에 다중 배열 MEMS CCR 을 가정하고 거리에 따른 반사 광 신호 시뮬레이션을 통하여 같은 사양의 베이스 스테이션을 쓰더라도 측정 가능 거리가 늘어날 수 있음을 보였다.

실제 센서 네트워크를 구성하는데 발생하는 또다른 문제점으로 무작위적으로 배치된 센서 노드에 의해 광 신호가 막혀 위치 인식이 되지 않거나 입사 방향에 따라 위치 인식이 되지 않는다는 점을 뽑았다. 베이스 스테이션은 광 신호의 직진성을 사용하여 위치 인식을 하기 때문에 베이스 스테이션과 센서 노드들이 일직선으로 배열되어 있거나 센서 노드와 베이스 스테이션 사이에 장애물이 있다면 위치 인식이 불가능하게 된다. 또한 거리에 따른 반사 광 신호에서 분석한 내용에서 알 수 있듯 MEMS CCR 에 입사하는 광 신호의 방향에 따라 반사되는 광 신호의 세기가

달라지므로 측정 가능 거리 안에 센서 노드가 있더라도 측정되지 않는 경우가 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해선 기존의 단일 베이스 스테이션이 아닌 다중 베이스 스테이션 시스템을 구성하여 다른 방향과 다른 각도에서 MEMS CCR 을 위치 인식하여 위에서 언급한 문제점을 해결할 수 있다.

위의 두 문제점을 해결하는 방안에서 공통적인 방법은 다중 베이스 스테이션을 이용하는 방법으로 실제 센서 네트워크를 구성하는데 다중 베이스 스테이션 구성이 필수적임을 확인할 수 있다. 측정 가능 거리가 향상된다는 점 외에 위치 인식 정확도를 확인하기 위해 기존의 베이스 스테이션으로 구성된 다중 베이스 스테이션 시스템으로 ToF 위치 인식과 AoA 위치 인식을 야외 환경을 가장한 실험 장소에서 실험을 수행하였고 위치 레퍼런스로 Vicon 카메라를 통해 위치 오차 및 베이스 스테이션 배열 오차를 최소화 하였다. 실험 결과를 통해 AoA 위치 인식 결과는 두 ToF 위치 인식 결과의 교집합과 같이 나타났고 두 위치 인식 결과를 후처리 하여 비교한 결과 AoA 위치 인식 기법이 ToF 위치 인식 기법보다 나은 정확도를 보임을 확인하였다. 이를 통해 다중 베이스 스테이션 시스템을 이용해 AoA 위치 인식 기법을 사용할 시 기존의 베이스 스테이션 시스템보다 측정 가능 거리 및 위치 정확도에서 더 나은 성능을 보인다는

결론을 내릴 수 있다. 이 외에 베이스 스테이션의 변경과 MEMS CCR 의 변경을 동시 적용한다면 10m 이상의 거리에서도 MEMS CCR 을 측정할 수 있다는 점을 예상할 수 있다.

참고문헌

- [1] Ground Sensors, <http://www.cmc-amman.gov.jo>
- [2] Improved Remotely Monitored Battlefield Sensor System, <http://www.L-3com.com/cs-east>
- [3] Surveillance Collection Observation Unit, http://www.lockheedmartin.com/data/assets/mfc/PC/MFC_SCOUT_pc.pdf
- [4] Jeffrey Heberley, "Advanced Acoustic Sensor Technologies," Armaments for the Army Transformation Conference, Vancouver, June, 2001.
- [5] Akos Ledeczi, "Shooter Localization," Vanderbilt Univ., 2003.
- [6] Sensor Node Platforms, <http://nesl.ee.ucla.edu/tutorials/mob-icom02/slides/Mobicom-Tutorial-2-MS.pdf>
- [7] Micro-Adaptive Multi-domain Power aware Sensors, <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>
- [8] Jane's IDR, http://www.textronddefense.com/pdfs/news/jidr06_01.pdf

- [9] J. M. Kahn, R. H. Katz, K. S. J. Pister, "Emerging Challenges: Mobile Networking for Smart Dust," *Journal of Communications and Networks*, Vol. 2, pp188-196, 2000.
- [10] Guoqiang Mao, Baris Fidan, Brian D. Anderson, "Wireless Sensor Network Localization Techniques," *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Volume 51 Issue 10, pp2529-2553, July, 2007.
- [11] Amitangshu Pal, "Localization Algorithms in Wireless Sensor Networks: Current Approaches and Future Challenges," *Network Protocols and Algorithms*, Vol. 2, no. 1, pp45-74, 2010.
- [12] Yunhao Liu, Xiaoping Wang, Lirong Jian, "Location, Localization and Localizability," *Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 25, no. 2, pp274-297, March, 2010.
- [13] J. M. Kahn, R. H. Katz, K. S. J. Pister, "Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust"", *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom99)*, seattle, WA, Aug. 17-19, 1999, pp. 271-278
- [14] R. D. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1990.

- [15] Xiaoming Zhu, Victor S. Hsu, Joseph 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.
- [16] Lixia Zhou, Joseph M. Kahn, Kristofer 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.
- [17] Minato, Atsushi; Sugimoto, Nobuo, “Design of a Four-Element, Hollow-Cube Corner Retroreflector for Satellites by use of a Genetic Algorithm”, Applied Optics, Vol. 37, Issue 3, pp. 438–442, 1998.
- [18] James E. Stewart, “Approximate phase conjugation with a retroreflecting array in microscopy” Applied Optics, Vol. 33, Issue 28, pp. 6651–6653, 1994.
- [19] Zurasky, James L, “Cube corner retroreflector test and analysis” Applied Optics, Vol. 15, Issue 2, pp. 445–452, 1976.
- [20] Hofmann, Reiner; Katterloher, Reinhard; Essenwanger, Peter, “Corner cube reflector for cryogenic interferometric use,” Applied Optics, Vol. 25, Issue 24, pp. 4614–4617, 1986.
- [21] James G Williams, Jean O Dickey, “Lunar Geophysics, Geodesy, and

- Dynamics” 13th International Workshop on Laser Ranging, 2002.
- [22] Minato, Atsushi; Ozawa, Satoru; Sugimoto, Nobuo, “Optical Design of a Hollow Cube-Corner Retroreflector for a Geosynchronous Satellite” *Applied Optics*, Vol. 40, Issue 9, pp. 1459-1463, 2001.
- [23] Minato, Atsushi; Sugimoto, Nobuo, “Design of a Four-Element, Hollow-Cube Corner Retroreflector for Satellites by use of a Genetic Algorithm”, *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 3, pp. 438-442, 1998.
- [24] N. Sugimoto and A. Minato, “Optical characteristics of the Retroreflector in Space for the Earth Observing Satellite,” *Opt. Rev.* **3**, 62-64, 1996.
- [25] 김재윤, “광학 센서네트워크에서의 센서노드 위치추정 기법,” 서울대학교 공학석사학위논문, 2011.
- [26] 장우협, “MEMS CCR을 이용한 광신호 기반 무선 센서 노드 위치 인식,” 서울대학교 석사학위 논문, 2012.
- [27] D. Lee, and J. Park, “Piezo-electrically Actuated Micro Corner Cube Retroreflector (CCR) for Free-space Optical Communication Applications,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, **5** no.2, 337-341, 2010.
- [28] Kay Römer, “The Lighthouse Location System for Smart Dust”, *MobiSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Mobile systems, applications and services*, pp. 15-30, 2003.

Abstract

In this paper, the phenomena and problems which could occur in sensor node localization of optics-based sensor network using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) CCR (Corner Cube Retro-reflector) are analyzed. Since CCR is a device which is made up three mutually orthogonal mirrors, an incident ray sent toward the CCR can be reflected back in the opposite direction of the incident ray. Using this characteristic, the distance between the sensor node and the base station can be calculated by measuring the difference in detection time of source and sink. So the position of the sensor node can be measured from the Time of Flight and the Angle of Arrival. However, using MEMS CCR, the power of the reflected ray is not strong enough to be detected because the size of MEMS CCR is under a millimeter and idealities of MEMS CCR including non-flatness and misalignment of structure are worse than that of commercial CCR. Furthermore, in randomly distributed optics-based wireless sensor network, sensor nodes may lie in a straight line from base station, so AoA of sensor nodes cannot be measured due to the straight ability of light. To overcome problems mentioned above, we analyze reflection process using MEMS CCR and base station, and simulate using analysis of reflected power of ray. And we propose subsystems which can make weak

power of reflected ray and angle of arrival detectable. The performance of the subsystems is verified by conducting experiments. The result of experiments shows that the MEMS CCR could be utilized in optics-based wireless sensor node localization and AoA localization is the best localization technique for optics based sensor node localization.

Keywords : Sensor network, Sensor node localization, ToF(Time of Flight), MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems), CCR(Corner Cube Retroreflector)

Student Number : 2011-23343