

# Searching and Autoalignment Method for Indoor Free-space Optical Communication

Kwanyong Lee<sup>1</sup>, Seung-Rae Cho<sup>2</sup>, and Chang-Hee Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>*LiDAR and Intelligent Optical Node (LION) Laboratory, Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea*

<sup>2</sup>*LG Digital Park High UHD Project, 222, LG-ro, Jinwi-myeon, Pyeongtaek 17709, Korea*

(Received September 30, 2019; Revised November 1, 2019; Accepted November 7, 2019)

We propose and demonstrate a searching and autoalignment method for indoor optical wireless communication, using a cost-effective retroreflective sheet and a microelectromechanical system (MEMS) mirror. We use an extremum-seeking method for a single axis and beam steering with a MEMS mirror to maintain a line of sight (LOS) with the optical link. This autoalignment method shows a receiver sensitivity of -31.87 dBm for a bit rate of 2.5 Gb/s over a 7 m communication link.

Keywords: Free space optical communication, Searching and auto-alignment, Direct line of sight

OCIS codes: (060.2605) Free-space optical communication; (060.4510) Optical communications

## 실내용 자유 공간 광 통신을 위한 수신단의 위치 탐색 및 자동 링크 정렬 방법

이관용<sup>1</sup> · 조승래<sup>2</sup> · 이창희<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>카이스트 전기 및 전자공학부

⊕ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원

<sup>2</sup>LG 디지털 파크 High UHD Project

⊕ 17709 경기도 평택시 진위면 엘지로 222

(2019년 9월 30일 받음, 2019년 11월 1일 수정본 받음, 2019년 11월 7일 게재 확정)

저렴한 retro-반사지와 미소 전자 기계 시스템(micro electro-mechanical system, MEMS) 거울을 이용한 실내용 무선 광 통신용 위치 탐색 및 자동 링크 정렬 방법을 제안하고 실험하였다. 직접적인 가시선(line of sight, LOS) 확보를 위하여 retro-반사지에서 돌아온 빛으로부터 수신단 위치를 파악하고 MEMS 거울을 통한 빔 조종으로 통신 링크를 자동 정렬하였다. 자동 정렬된 광 링크를 통하여 7 m 전송 거리에서 2.5 Gb/s NRZ 신호를 전송하여 비트 에러율  $10^{-12}$ 에서 수신 감도 -31.87 dBm의 성능을 가졌다.

Keywords: 자유 공간 광 통신, 탐색 및 자동 링크 정렬, 직접적 시야선

OCIS codes: (060.2605) Free-space optical communication; (060.4510) Optical communications

### I. 서 론

오늘날 스마트폰 및 통신 기술의 빠른 발달과 보급으로 많은 사람들이 자유롭게 메시지, 음성 통화, 영상 등을 네트워크를 활용하여 즐기고 있으며 VoIP (voice over IP), 실시간 스트리밍 영상(live streaming video), 사물 인터넷(internet of things), 가상 현실(virtual reality) 등 다양한 무선 통신 콘텐츠 및 환경이 새롭게 생겨나고 있다. 이에 따라서 실내용 무선 통신에 요구되는 대역폭은 빠른 추세로 증가하여 이를 만족하기 위한 새로운 실내용 초고속 무선 통신 기술의 필요성

이 대두되었다. 2024년의 세계 모바일 데이터 트래픽은 136 Exabyte 수준으로 2018년의 데이터 트래픽보다 약 5배 이상 증가할 것으로 전망되고 있다<sup>[1]</sup>.

현재 떠오르는 유망한 미래 무선 통신 수단은 무선 광 통신이다. 무선 광 통신은 Wi-Fi, 4G 등 무선 주파수(radio frequency, RF) 통신과 마찬가지로 전자기파를 사용하여 데이터를 송수신하지만, 가시광 영역 혹은 적외선 영역 등의 파장을 사용하므로 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 주파수에 대한 규제 혹은 라이선스를 필요로 하지 않으며, 거대한 대역폭을 이용하여 초고속 데이터 전송이 가능하다. 둘째,

<sup>†</sup>E-mail: [changheelee@kaist.ac.kr](mailto:changheelee@kaist.ac.kr), ORCID: 0000-0003-3458-7543

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

무선 주파수 신호 및 전자기 회로 등과 간섭을 일으키지 않아 비행기, 병원 등 간섭에 민감한 장소에서도 사용할 수 있다. 마지막으로 빛은 벽이나 장애물 등에 의해 쉽게 차단될 수 있기 때문에 외부 네트워크로부터 침입이 어려워 원천적으로 사생활을 보호할 수 있으며 도청자로부터 비교적 안전하여 보안성이 크다.

무선 광 통신은 LOS (line of sight) 링크를 이용하는 방법과 non-LOS 링크를 이용하는 방법으로 축약하여 구분할 수 있다<sup>[2]</sup>.

그림 1(a)는 직접적인 LOS 링크로, 송신단에서 방출되는 빔 확산각이 좁아 다중 통로(multipath)를 거치지 않고 송신광이 수신단으로 직접 조사되는 방식이다. 콜리메이션(collimation)된 빔을 사용하므로 송신단은 수신단의 위치로 정확하게 빛을 방출해야 통신이 원활하게 이루어진다. 따라서 이 링크 배치는 송신단과 수신단은 서로의 위치를 탐색하고 추적하여 링크가 끊어지지 않도록 유지하기 위한 별도의 조정 기술이 필요하다. 하지만 링크 정렬이 지속될 경우 통신 성능을 저해할 요소가 없기 때문에 기존의 유선 통신 정도의 고속의 통신이 가능하다는 장점을 가진다. 이러한 링크 방법을 통하여 수 Tb/s의 전송 속도의 가능성이 제시된 바 있다<sup>[3]</sup>.

그림 1(b)는 간접적인 LOS 링크이며, 송신단은 수신단의 위치와 거의 상관 없이 광 신호를 넓게 방출하여 통신하는 방법이다. 즉, 빛을 넓게 퍼트려 조사하기 때문에 수신 파워가 상대적으로 낮고, 주위 물체 등에서 반사된 빛도 같이 수신되므로 이로 인한 간섭으로 통신 성능을 저해하게 된다. 이러한 방식은 LED 조명을 활용하는 통신에서 이용되고 있으나, 다중 반사에 의한 간섭을 줄일 수 있는 통신 방식이, 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency domain multiplexing, OFDM) 방식, 같이 사용되고 있다. 또한, 수신광의 세기가 낮아 상대적으로 전송 속도가 느리다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서 연구한 직접적인 LOS 링크 확보를 위해 필수적인 위치 탐색 및 자동 링크 정렬 방법으로는, 송신단에 설치된 IR 카메라를 이용하여 수신단에 부착된 LED 고리의 위치를 파악하는 방법<sup>[4]</sup>, CMOS 이미지 센서를 이용하여 레이저 포인트의 위치와 수신기의 위치를 영상 처리를 통해서 수신단의 위치를 파악하는 방법<sup>[5]</sup> 등이 연구되었다. 하지만

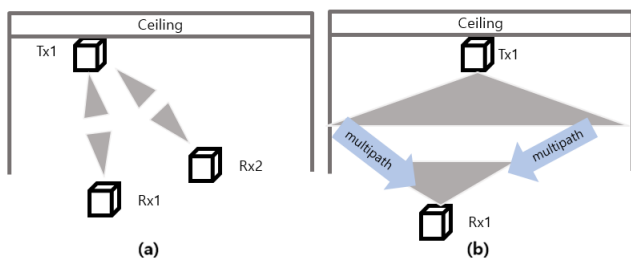


Fig. 1. Classification by link formation<sup>[2]</sup>. (a) Direct LOS link, (b) Indirect LOS link.

IR 카메라, CMOS 이미지 센서는 고가로 통신 장치의 가격 경쟁력을 낮추게 된다. 수신단의 위치를 특정하기 위하여 retro-반사체를 사용하는 연구가 진행되었는데<sup>[6]</sup>, retro-반사체(cat's eye)와 파장 별 빔 스플리터 등 많은 소자로 인한 시스템의 복잡도가 높고 경제성이 떨어진다.

본 연구에서는 간단하고 경제적인 수신단의 위치 탐색과 자동 링크 정렬에 대한 아이디어를 제시하고, 자동 링크 정렬 방안을 시뮬레이션 및 실험적으로 구현하였다. 저가의 retro-반사지(3M)를 사용하였으며, 빔의 방향 전환을 위해 MEMS 거울 및 MCU (micro controller unit)를 도입하였다. MEMS 거울의 크기에 의해 빔이 잘려 일어나는 회절 현상 및 비축 손실을 분석하고 거리에 따라서 광 전력 손실을 시뮬레이션하고 실험적으로 검증하였다. 또한, 수신광의 세기를 최대화하기 위하여 극 값 찾기(extremum seeking) 알고리즘을 적용하였다.

## II. 자유 공간 광학 링크 방법의 분석

### 2.1. 자유 공간 링크 모델링 및 회절 효과

제한된 수신단의 위치 탐색 및 자동 링크 정렬 방법의 실험 구성은 그림 2에 나타나있다. 광 송신기로부터 나오는 광 출력력이 탐색용 신호가 되어 광섬유 끝단에서 자유 공간으로 방출되는데, 이 빛이 렌즈를 지나며 콜리메이션 되고  $x, y$  축으로 회전 조정이 가능한 MEMS 거울에서 반사되어 진행 방향을 전환한다. 자유 공간으로 전파되는 탐색용 신호 빔이 retro-반사지에 조사될 경우 반사된 빛은 송신단으로 돌아와 위치 탐색용 광 수신기에서 검출된다. MCU는 MEMS 거울을 제어하기 위한 장치로, 광 수신기로부터 측정된 데이터를 바탕으로 retro-반사지의 위치 및 portable device의 거울의

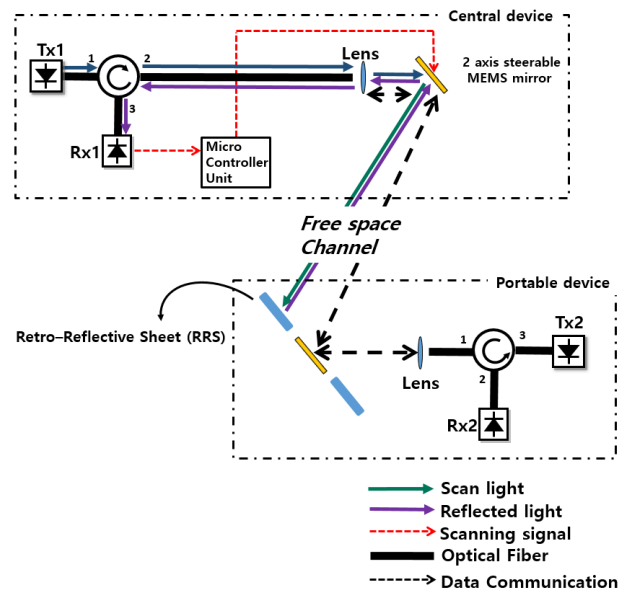


Fig. 2. System configuration of the proposed searching and auto-alignment system.

위치를 산출하여 정확한 위치로 빔의 방향을 조정한다. 광섬유 끝단은 APC (angled physical contact) 타입을 사용하여 끝단의 표면에서 반사된 빛이 광 수신기로 돌아오는 세기를 줄였다. 광학 circulator를 사용하여 하나의 광섬유에서 빛을 입사시켜 수신함과 동시에 광원의 빛을 방출시킬 수 있어 LOS 링크가 연결될 경우 양방향 통신이 가능하다. 본 연구에서는 탐색 이후 중앙 장치와 휴대용 장치 사이에서 이루어지는 통신은 대칭적인 구조를 가지기 때문에 본 연구에서는 Tx1에서 Rx2로의 데이터 전송만을 실험하였다.

그림 3은 본 연구의 통신 체계를 시뮬레이션하기 위해 간략화된 구조를 나타내고 있다. 송신부에서 방출되는 빛은 렌즈를 통과하며 콜리메이션되는데, 이후의 빛  $E_1$ 은 Gaussian 분포로 모델링할 수 있다.

$$E_1(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-i\left(kz - \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)\right)\right) \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-i\frac{kr^2}{2R(z)}\right) \quad (1)$$

위 식은 원통형 좌표계로 표시되었으며, 진행 방향은  $z$  축이다.  $E_0$ 는 원점에서의 전기장 세기를,  $k = 2\pi n/\lambda$ 는 파수를,  $w_0$ 와  $z_0 = kw_0^2/2$ 는 각각 최소 빔 너비와 Rayleigh range를,  $w(z) = w_0\sqrt{1+z^2/z_0^2}$ 는  $z$ 위치에서 전기장 세기가  $1/e$ 가 되는 반지름을,  $R(z) = z(1+z_0^2/z^2)$ 은  $z$ 위치에서 곡률 반경을 의미한다.

렌즈를 통과한 빛은 이후 MEMS 거울에서 반사되는데, 유한한 MEMS 거울의 크기로 인해 거울 바깥의 빔은 반사되지 못하므로 거울이 마치 슬릿처럼 작용하게 되며 본래 Gaussian 형태의 빛이 MEMS 거울 이후 분포가 변하게 된다. 이 변화를 모델링하기 위해서 Huygens-Fresnel 원리를 적용한다.

$$E_2(r', z_2) = \frac{-i}{\lambda} \iint_S \frac{1 + \cos\theta'}{2} E_1(r, z_1) \frac{\exp(ikR')}{R'} dS \quad (2)$$

$$E_3(r'', z_3) = \frac{-i}{\lambda} \iint_{S'} \frac{1 + \cos\theta''}{2} E_2(r', z_2) \frac{\exp(ikR'')}{R''} dS' \quad (3)$$

$$E_4(r''', z_4) = E_3(r'', z_3) \exp\left(\frac{ikr''^2}{2f_{lens}}\right) \quad (4)$$

$$\text{System Loss} = \frac{\left| \iint_{S'} E_4 \cdot E_1^* \Big|_{z=z_4} dA \right|^2}{\iint_S |E_1|^2 dA \iint_{S'} |E_1|^2 \Big|_{z=z_1} dA} \quad (5)$$

식 (2)와 (3)에서 빛이 진행하면서 유한한 크기의 구경 (MEMS 거울)에 의해서 잘리는 빔의 변화를 보기 위해 복소 상수  $-i/\lambda$ 와 inclination factor  $(1 + \cos(\theta'))/2$ 를 추가하여 면적분을 하였다<sup>7)</sup>. 면적  $S$ 와  $S'$ 는 각각 송신단과 수신단의 MEMS 거울의 면적을 의미하며, 변수  $r'$ ,  $r''$ ,  $r'''$ 은 각각  $z$  축 좌표 값  $z_2$ ,  $z_3$ ,  $z_4$ 에서의 광학축을 기준으로 하는 반지름

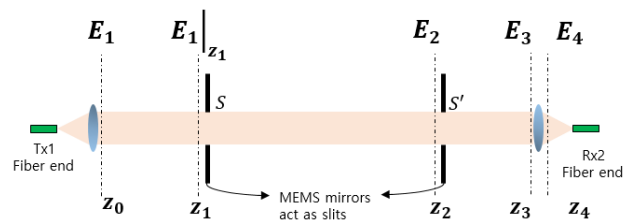


Fig. 3. Schematic diagram of free space link system modeling.

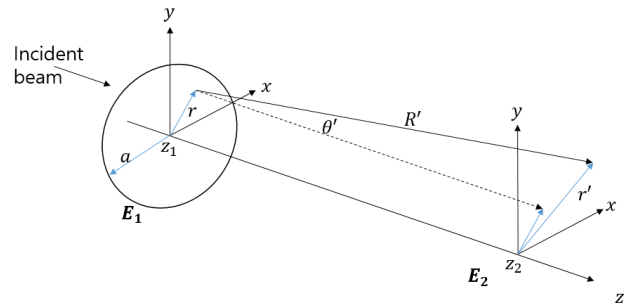


Fig. 4. Calculation of beam change with Huygens-Fresnel principle.

을 나타낸다(그림 3). 식에서 사용된  $\theta'$ 와  $R'$  등은 그림 4에 표시된 것과 같이 서로 다른  $z$ 축 좌표 값을 가지는 평면들의 좌표 사이의 거리와 각도를 나타낸다. 마지막으로 식 (5)에서 전체 링크의 광 손실을 수신단의 렌즈를 통과한 전기장과 송신단에서 발산된 전기장을 중첩 적분하여 계산하였다.

시뮬레이션에는 실험과 비슷한 조건을 맞추기 위하여 렌즈의 초점거리  $f_{lens} = 10$  mm, 단일 모드 광섬유의 mode field diameter를  $10.4 \mu\text{m}$ 로 가정하여 계산된 최소 빔 너비  $w_0 = 0.949$  mm, MEMS 거울의 반지름  $1.8$  mm가 사용되었다. 그림 5의 시뮬레이션 결과에서 빔이 진행하면서 회절이 일어나 Gaussian 분포 형태에서 벗어나는 것을 확인할 수 있다.

## 2.2. 비축 손실(Off-axis loss)

수신단 측으로 입사하는 빔의 광학축이 수신단의 광학축과 일치하지 않을 경우 비축 손실이 발생하게 된다. 그림 6과 같이 특정 점에 대해서 입사된 빔의 광학축을 원점으로 하는 좌표와 수신단의 광학축 기준의 좌표는 서로 다른 좌표를 가지기 때문에, 좌표 변환을 통해서 좌표를 바꾸어 비축 손실을 계산하였다. 수 미터의 전송 거리에 비해서 광학축 오차는 수 밀리미터 단위로 작아 광학축은 서로 평행하다고 가정하고( $z = z'$ ) 다음과 같은 좌표 변환을 실행하였다.

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + r_0^2 + 2r_1r_0\cos(\phi_1 - \phi_0)} \quad (6)$$

$r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ 는 각각 비축 손실, 수신단의 광학축 기준 반지름, 빔의 광학축 기준 반지름을 의미한다. 식 (6)의  $r_2$ 를 식 (1)의 Gaussian 빔 수식의  $r$ 에 대입하여  $E(r_1, z)$ 을 얻은 후, 수신단의 광학축을 원점으로 가지는 원(MEMS 거울)에 대한  $E$ 의 제공값을 면적분하고 이를 무한한 평면에 대해 면적분한 값

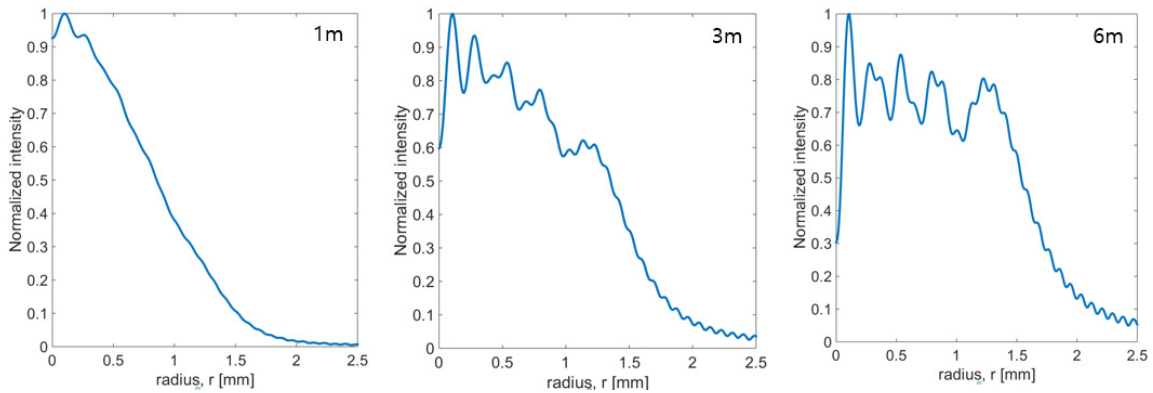


Fig. 5. Diffraction of a Gaussian beam with different transmission distances.

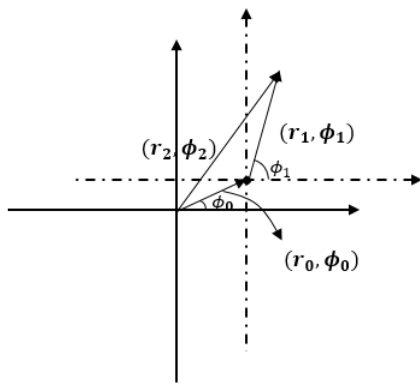


Fig. 6. Relation between two dislocated optical axes.

과 비교하여 거리에 따른 비축 손실을 계산하였다. 전체 링크 손실과 비축 손실의 계산 결과는 실험값과 함께 소개하겠다.

### III. Retro-반사지를 이용한 수신기의 위치 탐색 및 자동 정렬 방법

Retro-반사체는 최소한의 산란을 유지하며 입사된 빛을 광원의 방향으로 돌려보내는 장치이다. 본 연구에서는 이 반사체를 수신기 근처에 위치시켜 송신단의 탐색 신호가 반사체에 반사되어 돌아올 때의 신호를 분석하여 수신단의 위치를 탐색하는 방법을 사용하였다. Retro-반사체는 corner cube, cat's eye 등 여러 가지의 종류가 있지만, 정교함이 요구되는 값비싼 소자들로 구성되어 가격경쟁력이 불리하고, 크기와 무게에 의해 휴대용 장치에 부착하기 부담스러운 단점이 있다. 반면 retro-반사지는 glass bead라는 굴절 소자를 사용하여 입사광과 반사광이 공간상 같은 경로에 위치하며 가격이 상당히 저렴하고 가벼워 휴대기기에 부착하여도 부담이 되지 않는다는 장점이 있다. 다만 반사 성능이 다른 정교한 반사체에 비해 떨어지기 때문에, 되돌아오는 탐색 신호를 처리하기 위하여 잡음 억제와 신호 증폭이 필요하다. 본 연구에서는 3M사의 프리즘형 일반 반사지(3M-3430)를 사용하였으며, 반사지가 없는 경우와 비교하여 4 m 거리에서 10 dB 이

상의 반사 성능을 보였다. 입력 광 전력 0 dBm을 기준으로 반사되어 돌아오는 빛이 -35~-45 dBm의 낮은 반사를 보이기 때문에, 이득-대역폭 변동 가능한 수신기를 사용하여 최대 대역폭을 250 kHz로 제한하여 잡음을 억제하면서 30000 V/mW의 큰 증폭 이득을 얻어 ADC에 인가하였다. 탐색용 광 신호를 받아들이기 위한 MEMS 거울의 최대 대역폭이 200 Hz였기 때문에, 이득-대역폭 변동 수신기의 대역폭 제한은 수신단 탐색에 적용되기 충분하였다.

MEMS 거울은 Mirrorcle Technology사의 A7B1.1 거울과 구동 드라이버를 사용하였으며, 구동 드라이버는 MCU로부터 디지털 신호를 받아 MEMS 거울의 각도를 조정한다. 거울의 최대 동작 각도 범위는 x축  $\pm 6.67^\circ$ , y축  $\pm 6.62^\circ$ 이다. 탐색에 소요되는 시간을 줄이기 위해서 ‘초기 탐색’과 ‘정밀 탐색’의 단계로 진행하였다. ‘초기 탐색’은 retro-반사지의 위치를 대략적으로 파악하는 탐색으로, MEMS 거울 각도 변화의 이산 값을 크게 주어 비교적 빠르게 탐색하는 방법이다. 초기 탐색을 진행하면서 돌아오는 신호를 탐색용 광 수신기를 이용하여 측정하여 일정 값 이상의 입력이 들어오면 탐색을 멈추고 ‘정밀 탐색’으로 넘어가게 된다. ‘정밀 탐색’은 휴대용 장치의 MEMS 거울의 위치를 정확히 찾기 위해 탐색 구역을 좁혀 탐색한다. 이를 위해 탐색 구역에서 retro-반사지로부터 되돌아오는 신호를 측정하여 저장한 다음 알고리즘을 통해 휴대용 장치의 MEMS 거울의 위치를 계산하여 유추한다.

유한한 크기의 retro-반사지에서 반사되어 송신단으로 돌아온 빛은 회절 현상으로 인해 하나의 최대 점이 아닌 여러 개의 최대 점을 가지게 되기 때문에, 수신단 탐색 시에 반사된 빛의 전역 최대점(global maximum)을 찾아 반사지의 위치를 유추해야 한다. 본 연구에서는 그림 7에 나타난 것과 같이 ‘극 값 찾기 제어(extremum seeking control)’를 사용하여 제한된 정보만이 주어진 상황에서 전역 최대 점을 찾는 방법으로 접근하였다<sup>[8]</sup>.

먼저 정현 교란 입력  $a \sin(\omega t)$ 가 인가되어 함수의 비선형성을 탐지하고 변화도를 추정한다. 측정된 출력  $y = f(\theta)$ 는 고역 통과 필터를 지난 이후에 다시 정현 교란 입력과 곱해



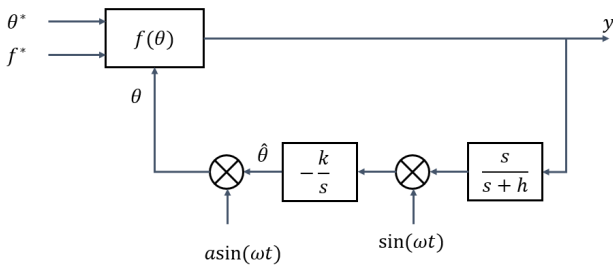


Fig. 7. Block diagram of extremum seeking control<sup>[7]</sup>.

저 적분기로 들어간다. 적분기는 추정치  $\hat{\theta}$ 를 경사도가 0인 방향으로 갱신하는데,  $k < 0$ 로 설정하여 추정치를 최대점으로 이끌게 하였다. 고역통과필터는 함수의 DC 성분을 제거하는 역할로 차단 주파수가 정현 주파수의 주파수보다 낮게 설정하였다. 교란 입력의 크기  $a$ 의 값이 클수록 탐지 가능한 함수 영역이 넓어지나 점근적 결과가 출렁이게 되므로 시간에 따라 지수적으로 감소하는 함수를 인가하여 해결이 가능하였고, 이득 변수인  $k$ 가 교란 입력 크기와  $a$ 와 더불어 수렴 속도를 결정한다.

#### IV. 실험 결과 및 토의

이전 장에서 제안된 수신단의 위치 탐색 및 자동 링크 정렬 방법을 실험적으로 검증하였다. 그림 8은 송신단과 수신단 측의 광축이 일치할 때 자유 공간 전송 거리에 따른 광 전력 손실을 시뮬레이션 결과와 비교하고 있다. 이 때 송신단과 수신단 모두 초점 거리가 10 mm인 렌즈를 사용하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 약 2 dB 정도의 차이를 보이는데, 이는 광섬유 끝단 표면과 AR (antireflection)이 되어 있지 않은 송신단 측 렌즈에서의  $|(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)|^2$ 의 반사율을 가지는 Fresnel 반사에 의한 약 1 dB의 손실과 수동으로 조절하는 렌즈와 광섬유 끝단의 링크 정렬 오차로 인한 것으로 판단된다.

그림 9는 자유 공간 전송 거리 별 비축 거리에 따른 광 전력 손실을 나타낸다. 비축 거리에 따른 광 전력 손실의 시뮬레이션에서 회절에 의한 효과를 배제하고 계산하였으나 실험적으로 측정된 결과와 일치함을 보여주고 있다. 수신 광 전력의 손실이 자유 공간 전송 거리가 늘어남에 따라서 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 빛이 진행하면서 빔의 너비가 넓어져 동일한 비축 거리에 대하여 손실이 줄어들기 때문이다.

실험에 사용된 retro-반사지는 가로, 세로 약 5 mm 정도의 크기로 수신단의 MEMS 거울 위아래로 붙여서 사용하였다. ‘초기 탐색’에서는 탐색 각도의 분해능을 0.0379°로 자유 공간 전송 거리가 7 m일 때 약 4.6 mm 정도가 되도록 하여 반사지를 탐색하였다. 탐색의 경로는 왼쪽 하단에서부터 시작하여 수평적으로 탐색한 후 수직적으로 한 단계 올라가 반대 방향으로 수평적으로 탐색하는 지그-재그 경로를 그리면서 탐색하였다. 초기 탐색의 목적은 대략적인 retro-반사지의 위

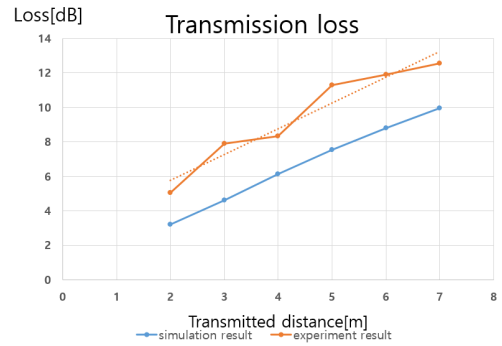


Fig. 8. Optical power loss with respect to the free space transmission distance.

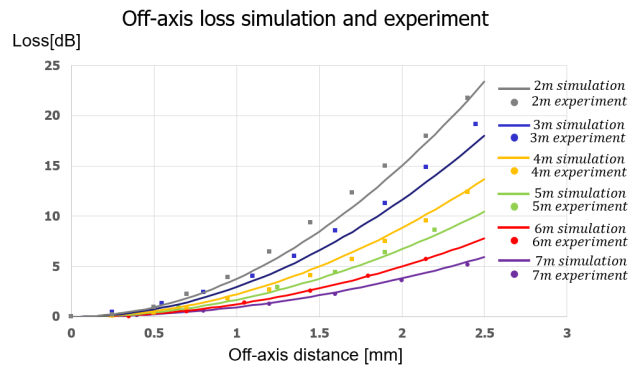


Fig. 9. Optical power loss with respect to the off-axis distance for different transmission distances.

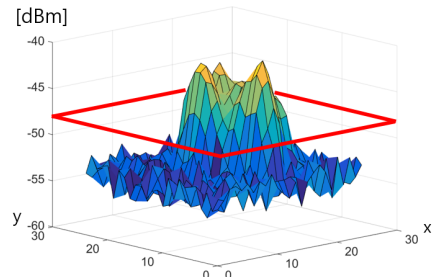


Fig. 10. Threshold of decision in searching the retro-reflective sheet (red line).

치 탐색에 있으므로 반사지로부터 반사되어 돌아온 신호가 송신단으로 돌아와 감지될 경우 초기 탐색을 중단하고 정밀 탐색의 단계를 진행한다. 탐색 신호는 1550 nm의 파장을 가지는 F-P (Fabry-Perot) 레이저로 0 dBm의 파워를 사용하였으며, 그림 10에 나타난 것과 같이 반사되어 돌아오는 신호의 감지 기준은 약 -48 dBm으로 설정하였다. 전체 구역에서 송신단의 위치가 무작위적일 때, 초기 탐색에 소요되는 평균 시간은 전체 구역을 탐색하는 시간의 절반이 된다. 본 실험 결과는 초기 탐색의 성능 증명을 위해 전체 구역을 탐색하였다. ‘정밀 탐색’은 초기 탐색에서 감지한 retro-반사지의 대략적인 위치 근처에서 세밀하게 탐색을 실행하기 위하여 탐색

각도의 분해능을 0.0143°로 설정하였다. 탐색 각도가 작을수록 탐색 시간이 줄어들기 때문에, 가장 짧은 1 m의 전송 거리에서 retro-반사지의 크기에 해당하는 0.42°를 탐색하였다. 탐색 구역에서 측정된 광 전력 값들은 저장된 이후 전역 최대점을 찾기 위한 알고리즘에 사용된다. 그림 11은 다른 전송 거리에 따른 초기 탐색과 정밀 탐색의 결과를 나타내고 있으며, (a)와 (c)에서 초기 탐색을, (b)와 (d)에서 정밀 탐색의 탐색 범위를 나타내고 있다. 정밀 탐색에서 측정한 데이터는 전역 최대점을 찾는 ‘극값 찾기’에 사용된다.

탐색을 통해 측정된 광 전력 값들은 ‘극값 찾기’ 제어를 거쳐 수신부의 정확한 위치 파악에 사용된다. 각 축의 각도 값은 독립적인 제어를 거쳐서 전역 최대점을 찾아가게 된다. 제어에 사용된 교란 입력  $a \sin(\omega t)$ 의 크기는 x, y축 각각 500, 200이며, 교란 입력의 주파수는 25, 적분기에서의 이득 k는 1로 실험적으로 설정되었다. 현행 교란 입력에는  $\exp(-t)$ 가 곱해져 교란 입력의 점근적 결과의 요동을 줄였다. 그림 12는 5 m 전송 거리에서 극값 찾기 제어를 적용하였을 때 시간에 따른 각도와 수신 광 전력 변화를 나타내고 있다. 전역

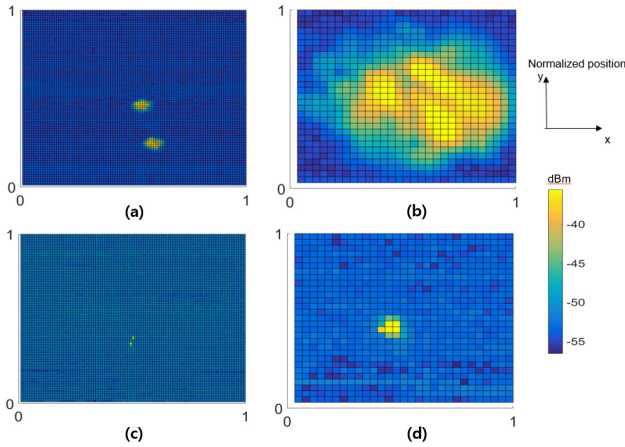


Fig. 11. Result of searching the retro-reflective sheet. (a) 1 m with coarse scan. (b) 1 m with fine scan. (c) 7 m with coarse scan. (d) 7 m with fine scan.

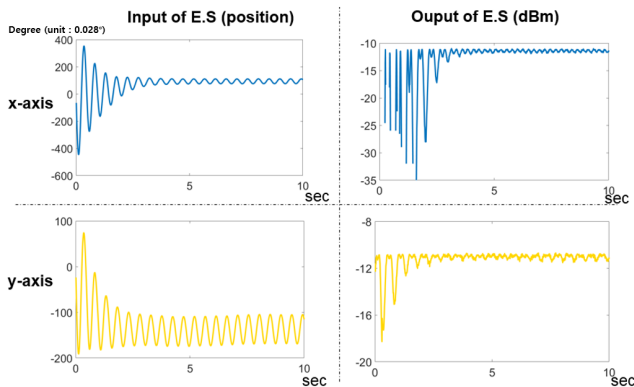


Fig. 12. Extremum seeking control result (free space transmission distance of 5 m).

최대점을 찾기 위해서 약 2초 정도가 소요되었으며, 제어가 시행된 이후 -12 dBm 정도의 수신 광 전력을 유지하였다. x, y축에서의 최대 탐색 가능 시야각은 ±5.5°로 측정되었다.

초기 및 정밀 탐색, 극값 찾기 제어를 통해 측정된 두 retro-반사지의 위치의 산술적인 평균을 통해서 수신단의 MEMS 거울 위치를 계산할 수 있다. 탐색이 이루어지고 난 이후에 송신단에서 수신단으로 전송 속도 2.5 Gbps의 신호를 전송하였으며, 수신 광 전력에 따른 BER (bit error rate)의 결과는 그림 13에 나타나있다. 이 때 ER (extinction ratio) 조건은 10 dB, PRBS31 신호를 NRZ 방식으로 마하젠더 광 변조기로 외부변조하여 전송하였다. BER 결과에서 back to back 상황과 7 m 상황에서 수신 감도 차이를 거의 보이지 않아 자유 공간의 전송 성능을 저해하는 요소가 없다는 이해와 같은 결과를 보였다.

실의 조건의 자유 공간 광 통신에는 태양빛이 광학적 배경 잡음으로 작용하여 통신 성능을 저하시키는데, 태양 빛이 약 5800 K의 흑체 복사 스펙트럼이 공기를 거치면서 일부 파장대에서 흡수된 형태로, 1550 nm의 파장에서 강한 세기를 가지고 있기 때문이다. 하지만 실내에서 작용하는 광학적 배경 잡음은 창문을 통해 들어오는 햇빛 이외에 실내용 조명에 의한 영향도 예상된다. 현재 사용되는 조명인 형광등이나 LED 조명의 경우 1550 nm 주변 대역에서의 광 전력이 거의 없고 [9] 제안하는 방법에 사용된 APD의 파장 대역이 가시광 영역을 포함하고 있지 않아 영향이 미미하다. 수신단에 들어오는 태양광의 세기  $P_{solar}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_{solar} = (\pi a_r^2) \cdot E_{e,\lambda} \cdot BW_{APD} \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \quad (7)$$

$a_r$ 은 렌즈의 반지름으로서 실험에서 사용된 2.5 mm이며,  $E_{e,\lambda}$ 는 스펙트럼 조도(spectral irradiance)로 태양광이 실내 조명에 사용되는 500 lux와 같은 조도로 가정하였을 때 1550 nm의 값인 약  $1.25 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{nm}$ , 그리고  $BW_{APD}$ 는 APD의 수신 파장 대역폭으로 1500 nm에서 1670 nm 사이의 170 nm

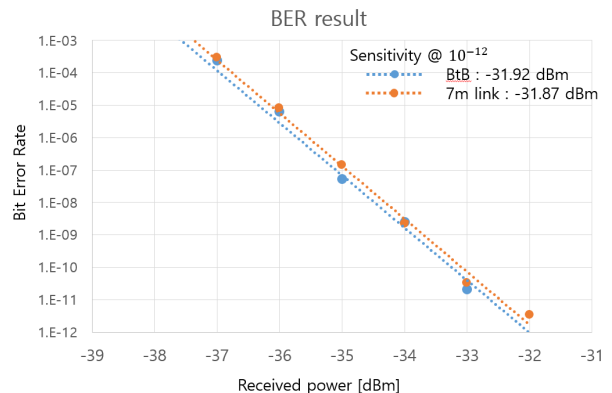


Fig. 13. BER measurement result of free space optical communication (free space transmission distance of 7 m).

가 적용되었다.  $\Omega$ 는 시야각  $\theta_{FOV}$ 를 입체각으로 확장한 값으로  $2\pi(1 - \cos\theta_{FOV})$ 이며  $14^\circ$ 의 시야각에서 0.187 sr을 가지고, 반구의 입체각에 해당하는  $2\pi$  sr로 나누어 전체 입사 태양광에 대해서 커플링되는 세기의 상대적인 값을 계산하였다. 이를 통해서 계산된 태양광은 -39 dBm으로 신호에 비해 비교적 작은 값을 가졌다. 실제 통신 환경에서 수신단이 태양빛이 들어오는 창문을 직접적으로 바라보지 않을 경우 계산된 값보다 훨씬 작은 값이 예상되며, 유리창과 유리창의 코팅에 의해 적외선 대역의 파장을 가지는 빛이 흡수되어 세기가 더욱 낮아질 가능성이 있어 태양광이 통신 품질에 영향을 미치는 정도는 미미하다고 볼 수 있다.

광섬유 끝단의 중심부가 약 10  $\mu\text{m}$  정도이기 때문에 전송된 빛이 최적의 경로로 입사되기에는 어려움이 있다. 수신부에서의 도착 입사 각(angle of arrival)에 따른 입사 광 전력 손실을 줄이기 위해서 광섬유 끝단으로 입사시키지 않고 공기중으로 노출된 광 검출 넓이가 넓은 APD를 사용하여 개선시킬 수 있다. 광 검출부의 직경이 단일 모드 광섬유 중심부의 20배인 약 200  $\mu\text{m}$ 인 APD를 사용할 경우 도착 입사각에 따른 광 전력 손실을 줄이고 최적의 경로로 입사시키기 용이해진다는 장점이 있다. 이 때 수신부의 광 시야각은  $14.6^\circ$  정도로 단일 모드 광섬유를 사용할 때와 비슷한 값을 가져 배경 잡음에 의해 동일하게 큰 영향을 받지 않을 것이다.

## V. 결 론

본 연구에서는 직접적인 LOS를 사용하는 무선 광 통신의 가장 필요한 기술 중 하나인 수신단의 위치 탐색 기술 및 자동 링크 정렬 방법을 경제적인 retro-반사지를 이용하여 구현하였다. Retro-반사지의 낮은 반사율로 인해 이득-대역폭 변동 가능한 수신기를 사용하였다. 또한, 유한한 MEMS 거울 크기에 의한 회절 현상과 광 전송 거리와 비축 거리에 따른 광 손실을 시뮬레이션을 통해 계산하였으며 실험적으로 검증하였다. 초기 탐색, 정밀 탐색 및 극 값 찾기 제어를 통해서 수신단의 위치를 정확하게 파악하였으며 데이터 전송 실험을 통해서 back to back과 거의 일치함을 보였다.

## References

1. Ericsson, "Mobile data traffic growth outlook," (Ericsson Mobility Report, November 2018), <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2018/mobile-data-traffic-growth-outlook>.
2. J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proc. IEEE* **85**, 265-298 (1997).
3. A. Gomez, C. Quintana, G. Faulkner, and D. O'Brien, "Challenges in wide coverage indoor optical communications using fibre-wireless-fibre links for terabit data rates," in *Proc. IEEE Globecom Workshops* (USA, San Diego, Dec. 2015), pp. 1-5.
4. A. Gomez, K. Shi, C. Quintana, G. Faulkner, B. C. Thomsen, and D. O'Brien, "A 50 Gb/s transparent indoor optical wireless communication link with an integrated localization and tracking system," *J. Lightwave Technol.* **34**, 2510-2517 (2016).
5. P. Brandl, A. Weiss, and H. Zimmermann, "Automated alignment system for optical wireless communication systems using image recognition," *Opt. Lett.* **39**, 4045-4048 (2014).
6. S. Jeon and H. Toshiyoshi, "A bi-directional free-space optical communication system with MEMS spatial light modulator for agile data link," in *Proc. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (USA, Las Vegas, Jan. 2017), pp. 297-300.
7. H. G. Kraus, "Huygens-Fresnel-Kirchhoff wave-front diffraction formulation: paraxial and exact Gaussian laser beams," *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 47-65 (1990).
8. M. Krstic and H. H. Wang, "Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems," *Automatica* **36**, 595-601 (2000).
9. A. Virtuani, E. Lotter, and M. Powalla, "Influence of the light source on the low-irradiance performance of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90**, 2141-2149 (2006).