

Lidar Sensor Optical System Design for Miniaturization and Weight Reduction

Byung-Ho Ha^{1,a}, Dong-Seok Choi^{2,b}, Young-Bin Kwon^{2,c}, Suk-Hun Jung^{2,d}, Bo-Sun Kang^{3,e}, Seong-Ryul Lee^{4,f},
and Ki-Hong Kim^{5,g,*}

¹Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Post-doc, Gyeongsan 38430, Korea

²Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Student, Gyeongsan 38430, Korea

³Department of Radiological Science, Konyang University, Professor, Daejeon 35365, Korea

⁴Dept. of Optometry & Vision Science, Gimhae University, Professor, Gimhae 50811, Korea

⁵Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University, Professor, Gyeongsan 38430, Korea

(Received August 30, 2024; Revised September 13, 2024; Accepted September 26, 2024)

Purpose: Recently, the importance of LiDAR sensors has been emphasized in various applications. This study aimed to design an ultra-wide-angle LiDAR sensor optical system to achieve miniaturization, reduce costs, and enhance optical performance. **Methods:** A miniaturization design was implemented for both the relay and fisheye lenses. The design goal was to minimize the total track length (TTL). The performance was evaluated by analyzing distortion and spot diagrams for the same field of view and minimized thickness in the initial design. **Results:** A compact design was achieved by maintaining a field of view of 176° while reducing the TTL to 13.53 mm, thus meeting the design target. The analysis of distortion aberration revealed values comparable to those found in previous studies at wider field angles, and the spot diagram analysis demonstrated improved optical performance, with light converging to a more focused spot compared to those presented in prior literature. **Conclusions:** This study successfully designed a miniaturized LiDAR sensor optical system. This achievement is expected to contribute to the commercialization of advanced technologies by reducing costs and increasing production efficiency.

Key words: LiDAR, Miniaturization, Fisheye lens, Optical design

1. 서 론

최근 자율주행 자동차, 드론, 로봇 등 다양한 첨단 기술 분야에서 LiDAR(light detection and ranging) 센서가 요구되고 있다. 라이다 센서는 레이저를 이용해 물체와의 거리를 측정하고, 이를 통해 3D 공간 정보를 얻는 기술로, 고정밀 소형 라이다 센서는 자율주행 자동차와 드론 등에서 필수적인 장치이다.^[1] 라이다 센서의 물체 인식은 자율주행 차량이나 드론에 활용하는 경우, 넓은 범위를 단번에 스캔하여 많은 데이터를 수집하고 감지하는 것을 요구한다. 또한, 빛을 이용하여 거리를 측정하기 때문에 환경적인 영향과 대량의 데이터 처리 및 비용에 대한 문제점이 지적되고 있다. 특히, 비용의 문제는 첨단 기술의 발전 및 활용에 제약이 생겨 상용화가 지연되고, 시장 경쟁력을 저하시킬 수 있다.^[2] 이에 따라 비용이 절감되며 적절한 시야각을 확보할 수 있는 준 기계식 라이다 센서 구조가 적절

할 수 있다. 본 연구에서는 초광각 라이다 센서 광학계를 소형화하는 것을 목표로 동일한 시야각을 유지하면서 광학계를 설계하고 기존 설계와 비교 분석하고자 한다.^[3] 소형화된 광학계는 구성요소를 최소화하여 비용을 절감하고, 생산 효율성을 높여 향후 첨단 기술 분야에서의 상용화에 밑거름이 될 수 있을 것이라 판단된다.

2. 방 법

2.1. 초기 설계

라이다 광학계 설계에는 광학 설계 소프트웨어 Code V Version 11.5를 활용한다.^[4] 라이다 센서는 빔을 조향하는 방식에 따라 기계식 라이다, 준기계식 라이다, 비기계식 라이다로 나누어진다.^[5] 앞서 선정된 준 기계식 라이다는 마이크로 액츄에이터, Relay Lens, Fisheye Lens로 총 3개가 결합된 구성으로 작은 크기의 라이다 센싱 시스템을

*Corresponding author: Ki-Hong Kim, TEL: +82-53-850-2551, E-mail: kkh2337@cu.ac.kr

Authors ORCID: ^a<https://orcid.org/0000-0003-4825-933X>, ^b<https://orcid.org/0009-0000-4431-0068>, ^c<https://orcid.org/0009-0006-8708-2900>, ^d<https://orcid.org/0009-0009-9951-7790>, ^e<https://orcid.org/0000-0003-0193-5302>, ^f<https://orcid.org/0000-0002-9304-033X>, ^g<https://orcid.org/0000-0003-0876-6169>

구현하는 것이 소형화에 적합하다 판단이 들어 채택하였다.^[3] 이에 본 연구에서는 relay lens와 fisheye lens를 설계하고자 한다.

2.2. 설계 및 목표 사양

본 연구에서는 앞서 선정된 설계 형태에 사용되는 relay lens와 fisheye lens의 소형화를 목표로 렌즈 매수를 줄이고, 렌즈 간의 거리 조정 및 비구면 렌즈를 추가함으로써 total track length(TTL)을 줄이는 것을 목표로 설계하였다. 릴레이 렌즈와 광각 렌즈의 TTL은 짧아질수록 빛이 이동하는 거리가 줄어들어 측정 데이터를 더 빠르게 처리할 수 있도록 각각 12 mm, 14 mm로 최소화하며 광각 렌즈의 시야각은 유지하며 렌즈 매수를 줄인 소형 라이더 센서 광학계를 설계하고자 한다. 설계된 렌즈의 목표 사양은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 광학계의 파장은 근적외선에서 높은 에너지에도 불구하고 사람의 눈에 안전한 광출력을 사용할 수 있도록 1,550 nm로 설정하였다.^[6] 이후 각각의 렌즈의 광학적 성능을 평가하기 위해 distortion,

spot diagram을 평가하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Relay lens

설계된 릴레이 렌즈의 도면과 설계 사양은 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. Choi 등의 연구에서 설계한 광학계의 릴레이 렌즈와 비교하여 릴레이 렌즈의 렌즈 개수는 그대로지만 소형화를 위한 Total Track Length 14.67 mm 감소시켜 12 mm인 광학계를 구현하였다. 소형화하고 광학적 성능이 향상된 광학계의 설계 조건을 달성하였다.

3.2. Fishyeye lens

어안 렌즈 광학계의 시야각 176°, F-number 2.5, TTL 13.53 mm으로 설계하여 기존 Choi등의^[3] 연구와 비교하여 광각 렌즈 광학계의 전장의 길이보다 34.75 mm 감소시켰다. 광각 렌즈 광학계의 레이아웃과 설계 사양은 Fig. 2와 Table 4에 나타내었다.

Table 1. Fisheye lens specifications

Parameters	Target Value
F# number	2.5
Field of View (FOV) (degree)	176°
Total Track Length (mm)	13.53
Number of lenses	6

Table 2. Relay lens specifications

Parameters	Target Value
Effective Focal Length	19.69
Total Track Length (mm)	12
Number of lenses	5

Table 3. Relay lens specification

Surface	Radius (mm)	Thickness (mm)	Index	Abbe No.
1 (STOP)	0.0000	20.0000		
2	0.1057	1.2251	1.721	29.2
3	-0.0082	0.8633		
4	-0.0175	0.9025	1.721	29.2
5	-0.0087	0.5781		
6	0.1663	0.9400	1.721	29.2
7	0.1414	1.5218		
8	-0.0609	0.8772	1.721	29.2
9	-0.0433	0.7986		
10	0.0017	0.9745	1.564	63.6
11	0.1662	7.9187		
Image	0.0000	0.0000		

1) Distortion

Fig. 3와 Fig. 4에 어안 렌즈와 릴레이 렌즈의 왜곡수치

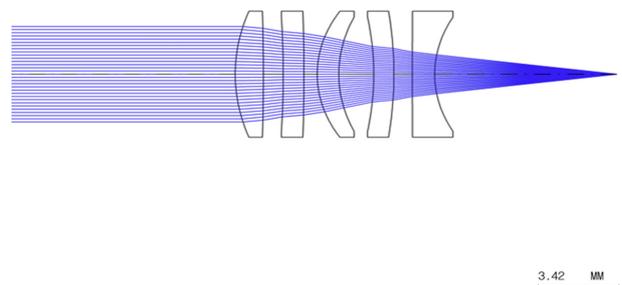


Fig. 1. Relay lens design.

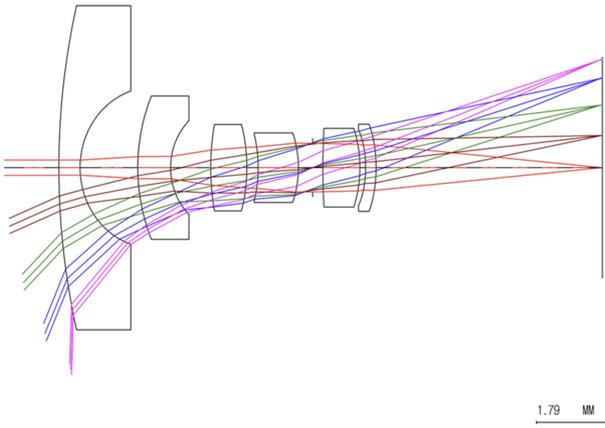


Fig. 2. Fisheye lens design.

그리드를 나타내었으며 왼쪽 그림의 y축은 수평 방향의 각도를 나타낸다. 특히, Fig. 4의 우측 그림에서 확인할 수 있듯이 릴레이 렌즈의 왜곡수치가 매우 낮은 것으로 나타

났다. 왜곡수치는 기존 Heo 등의^[7] 연구와 비교하여 넓은 화각을 구현함에도 불구하고 유사한 형태의 배럴 형태의 이미지를 보여주었다. 이미징 렌즈에서 발생하는 왜곡은 넓은 화각으로 인해 발생하는 기본적인 현상이기 때문에 감소할 수 있는 요소에 대한 고찰을 필요로 한다.

3) Spot diagram

최적화 설계된 어안 렌즈와 릴레이 렌즈의 스폿 다이어그램은 수평과 수직의 방향의 특성인 y축 x축의 특성이 동일하여 y축만을 제시하였으며 Fig. 5와 Fig. 6에서 나타내었다. y축에 표시된 수평 방향의 각도 0에서 88도까지 22도 간격의 조건별 4개의 스폿 사이즈가 기존 연구 대비 현저하게 감소하여, 특히 이미지 중심부에서 높은 해상도를 확보할 수 있음을 확인하였다. 이는 렌즈 시스템의 광학 성능이 크게 향상되었음을 의미하며, 고해상도 이미지 획득이 요구되는 응용 분야에 적합할 것으로 판단된다.^[8]

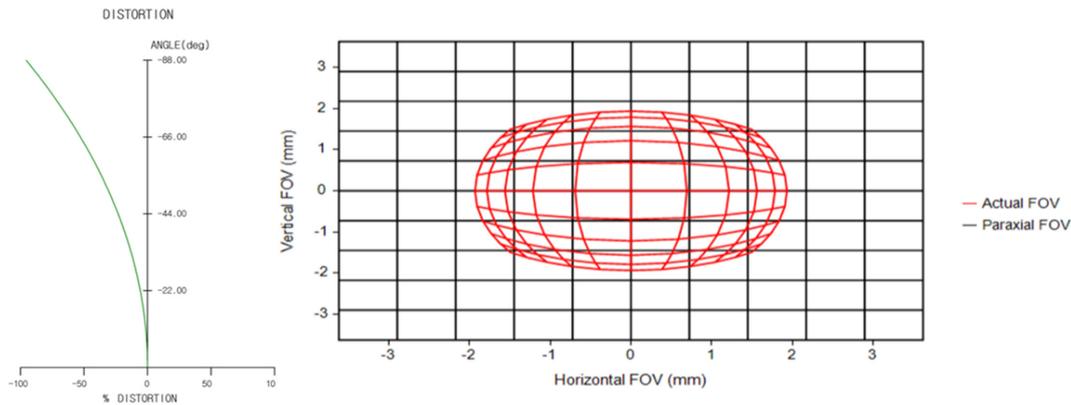


Fig. 3. Fisheye lens distortion grid.

Table 4. Fisheye lens specification

Surface	Radius (mm)	Thickness (mm)	Index	Abbe No.
1	0.0647	0.5281	1.656	54.1
2	0.5492	1.4370		
3	0.2455	0.8156	1.743	44.8
4	0.6854	1.0000		
5	0.2028	0.9000	1.487	70.4
6	-0.2724	0.2812		
7	-0.3449	1.0000	1.600	61.3
8	-0.4453	0.3599		
9 (STOP)	0.0000	0.2492		
10	0.0650	0.9229	1.514	67.6
11	-0.3778	0.1433		
12	-0.4243	0.2600	1.755	27.5
13	-0.3163	5.6295		
Image	0.0000	0.0000		

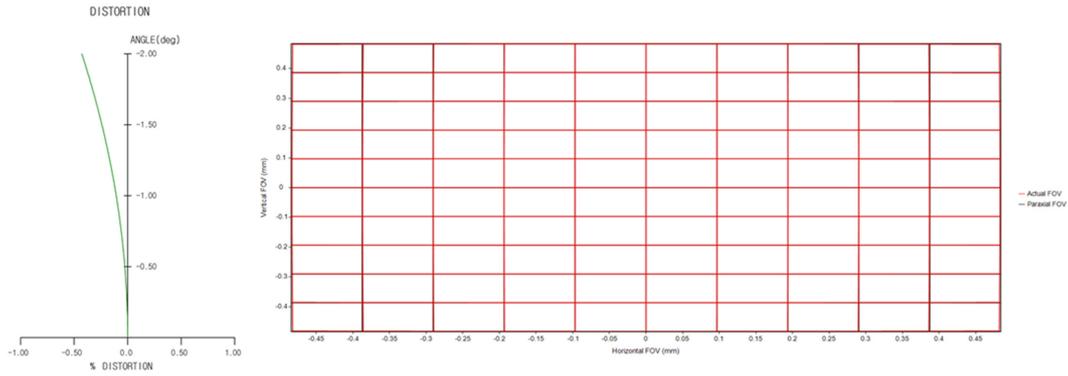


Fig. 4. Relay lens distortion grid.

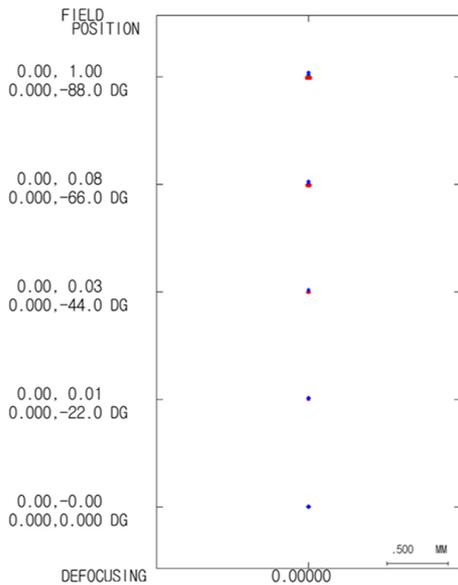


Fig. 5. Fisheye lens spot diagram.

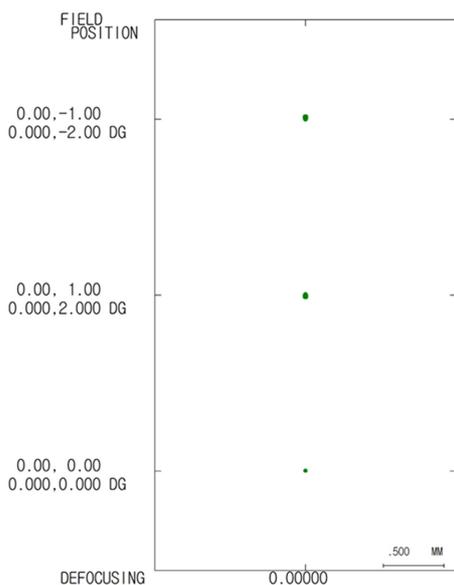


Fig. 6. Relay lens spot diagram.

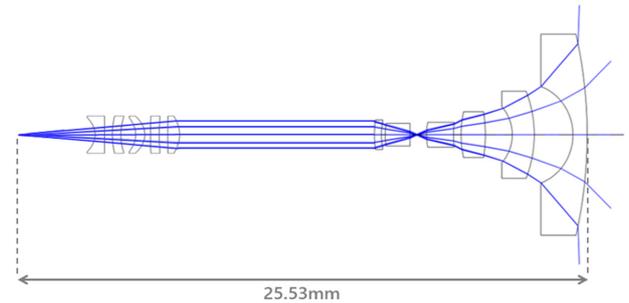


Fig. 7. Design result.

3.3. 최종 설계

최종적으로 릴레이 렌즈 광학계, 광각 렌즈 광학계를 결합하여 총 전장 길이가 26 mm이내인 소형 준기계식 라이다 광학계를 설계하여 목표로 한 설계에 만족하였다. 릴레이 렌즈와 광각 렌즈를 결합한 라이다 센서의 개략도를 Fig. 7에서 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 초광각 시야각을 가진 소형 라이다 광학계를 보완 설계하였다. 릴레이 렌즈와 어안 렌즈의 렌즈 배수를 줄여 최소화된 전장 길이를 확보하였고 비구면 렌즈를 사용하여 라이다 센서의 소형화와 최소한의 수차를 가진 광학계를 설계하였다. 라이다 센서의 높은 정밀도와 소형화는 자율주행 자동차, 드론, 로봇 등 다양한 응용 분야에서 매우 중요하며, 높은 정밀도는 정확한 거리 측정과 고해상도 3D 맵 생성, 장애물 회피 및 경로 계획에 필수적이다. 라이다 센서의 소형화 및 경량화는 다양한 플랫폼에서의 적용 가능성을 높이고, 무게 감소와 에너지 효율성, 비용 절감 등의 장점을 가진다. 또한 안광학 분야에서는 AR/VR, 스마트글라스, 시각 장애인을 위한 시기능 보조 기기, 아이 트래커를 통한 홍채 인식 및 안과 진단 장비 등 다양한 분야에 적용 가능하다. 이에 본 연구는 라이다 센서 광학계 연구의 새로운 기술과의 융합으로 라이다 센

서의 기능을 확장함으로써 비용적 효율성과 안전성 확보 및 신뢰성 향상의 기반을 마련할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Choe HY, Lidar sensor technology and industry trends. The Korean Institute of Electrical Engineers. 2017;66(9):12-17.
- [2] Jeong JS, Min JD. Trends in precision positioning technology for automobiles. Information and Communications Magazine. 2015;32(8):38-44.
- [3] Choi H, Kim WC. Optical system design for light detection and ranging sensor with an ultra-wide field-of-view using a micro actuator. Microsyst Technol. 2020;26(11):3561-3567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04997-1>
- [4] Novak M. Application in optical design: optimization for receiver enclosed energy in lidar systems, 2017. <https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/optical-solutions/documents/whitepapers/code-v-lidar-enclosed-energy-systems-wp.pdf>(28 August 2024).
- [5] Li N, Ho CP, Xue J, et al. A progress review on solid-state LiDAR and nanophotonics-based LiDAR sensors. Laser Photonics Rev. 2022;16(11):2100511. DOI: <https://doi.org/10.1002/lpor.202100511>
- [6] Choi GD, Han MH, Song MH, et al. Development trends and expectation of three-dimensional imager based on LIDAR technology for autonomous smart car navigation. Electronics and Telecommunications Trends. 2016;31(4):86-97.
- [7] Heo SY. Wide field of view LiDAR sensing optics design based on two-dimensional micro translation of single objective lens. MA Thesis. Hanbat National University, Daejeon. 2022;30-31.
- [8] Zohrabi M, Lim WY, Cormack RH, et al. Lidar system with nonmechanical electrowetting-based wide-angle beam steering. Opt Express. 2019;27(4):4404-4415. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.27.004404>

소형화 및 경량화를 위한 라이다 센서 광학계 설계

하병호¹, 최동석², 권영빈², 정석훈², 강보선³, 이성률⁴, 김기홍^{5,*}

¹대구가톨릭대학교 안경광학과, 박사후연구원, 경산 38430

²대구가톨릭대학교 안경광학과, 학생, 경산 38430

³건양대학교 방사선학과, 교수, 대전 35365

⁴김해대학교 안경광학과, 교수, 김해 50811

⁵대구가톨릭대학교 안경광학과, 교수, 경산 38430

투고일(2024년 8월 30일), 수정일(2024년 9월 13일), 게재확정일(2024년 9월 26일)

목적: 최근 다양한 응용 분야에서 라이다 센서의 중요성이 강조되고 있다. 이에 본 연구에서는 초광각 라이다 센서 광학계를 소형화를 통하여 비용을 절감하고 광학적 성능을 높이는 것을 목표로 설계하고자 한다. **방법:** relay lens와 fisheye lens를 소형화하는 설계를 진행하였다. total track length(TTL)의 최소화를 목표 설계로 두었다. 초기 설계와 동일한 화각과 최소화된 두께에서 distortion과 spot diagram을 분석하고자 한다. **결과:** 어안 렌즈의 시야각을 176°로 유지하면서 TTL을 13.53mm로 줄이는 소형화를 구현하여 목표 설계에 달성하였다. 왜곡수치는 더 넓은 시야각에서 기존 연구와 유사한 수치를 가지며 스폿 다이어그램 분석 결과는 기존 연구보다 한 점에 집중된 형태로 개선된 광학적 성능을 보였다. **결론:** 본 연구에서는 소형화된 라이다 센서 광학계를 설계하였다. 이는 비용 절감과 생산 효율성을 높여 첨단 기술의 상용화에 기여할 것으로 판단된다.

주제어: 라이다, 소형화, 어안 렌즈, 광학 설계