

적외선 센서를 이용한 곡면에서의 거리 측정

민덕호^a, 정민재^b, 김형진^b, 서영호^b, 김병희^{b*}

Distance Measurement Using Infrared Sensor On Curved Surface

Deok Ho Min^a, Min-Jae Jeong^b, Hyung Jin Kim^b, Young Ho Seo^b, Byeong Hee Kim^{b*}

^a C&VTech Inc, 1-203 Medical Industry Techno-center, 42-10 Taejanggongdan-gil, Wonju-city, Gangwon-do, 26311, Korea

^b Department of Advanced Mechanical Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Korea

Received 24 May 2017; Revised 23 August 2017; Accepted 24 August 2017

Abstract

In this paper, we have extended the research on the infrared sensor which has been limited to the plane. The reflection mechanism of the light on the curved surface is analyzed according to the curvature change and the emitted angle of photodiode and verified through experiments. The difference in the curvature causes a difference in the measurement distance, and also changes the intensity of the light coming into the phototransistor, thereby causing a difference in the output voltage. However, the difference in the output voltage due to the curvature change can be solved by adjusting the emitted angle of the photodiode to minimize the spot area formed on the curved surface regardless of the curvature. Therefore, it is possible to measure the distance by using the infrared sensor regardless of the curvature by aligning the photodiode to the center of the curved surface and adjusting the angle of the photodiode.

Keywords: Infrared sensor, Curved surface, Distance measurement, Emitted angle

1. 서론

최근 정보통신기술(ICT)이 발전함에 따라 자동차, 반도체, 항공, 방산 등 전 산업에 걸쳐 4차 산업 혁명시대가 도래하고 있다. 4차 산업 혁명 시대가 열리면서 효율성과 생산성을 증대시키기 위해 지능적, 자동적으로 사물을 제어하고 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT) 등의 기술을 갖춘 지능형 로봇이 요구되고 있다^{1, 2)}.

지능형 로봇이 사물을 인지하고 자동적으로 제어하기 위해서 인간의 오감에 해당하는 센서 기술이 필요하다³⁾. 또한, 그 중에서도 로봇이 사물을 감지할 수 있도록 로봇과 장애물사이의 거리를 측정할 수 있는 거리 측정 센서에 대한 연구가 필수적이다.

비접촉 거리 측정 센서로는 흔히 적외선, 초음파, 레이저 등이 사용되고 있으며, 그 중에서도 상대적으로 가격이 저렴하고, 응답속도가 빠른 적외선을 이용한 거리 측정 센서가 가장 폭넓게 사용되고 있다⁴⁻⁷⁾.

적외선을 이용한 거리 측정 센서는 반사되어 돌아오는 빛의 강도가 센서와 측정물 사이의 거리가 증가할수록 감소하므로 거리에 따른 빛의 강도를 측정해 측정물과 센서 사이의 거리로 환산한다⁵⁻⁷⁾. 그러므로 적외선을 이용한 거리 측정 센서는 장애물의 색상, 크기, 표면 재질 등에 따라 출력 특성이 달라지는 광학적 특징을 가지고 있다⁴⁻⁷⁾. 이러한, 적외선을 이용한 거리 측정 센서에 대한 연구는 과거부터 현재까지 활발히 진행되고 있으나, 대다수의 연구가 장애물을 평면으로 한정하고 평면의 색상, 거칠기, 크기에 따른 출력 특성 변화를 비교하는 연구에 국한 되어왔다⁴⁻⁷⁾.

4차 산업 혁명의 가장 주목할 만 한 패러다임은 ‘제조업’의 혁신이다. 3D프린팅을 기반으로 나노재료, 기능재료, 바이오소재 등을 이용해 제품의 복잡성과 다기능성이 향상됨에 따라 산업계에 보다 정밀하고 복잡한 형상의 제품을 요구하고 있다⁸⁾. 따라서, 인간을 대체할 지능형 로봇은 이러한 복잡한 형상의 사물을 인지하고 주변 환경에 대한 이해도를 높여 그에 맞게 빠르게 대응할 수 있어야 한다. 따라서, 기존의 폭넓게 사용되어온 적외선을 이용한 거리 측정 센서에 대한 연구가 평면에 국한되지 않고, 곡면 또는 복잡한 형상의 구조물에 대한 연구로 반드시 확장되어야 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-33-244-6374

fax: +82-33-259-5551

E-mail address: kbh@kangwon.ac.kr (Byeong Hee Kim).

본 논문에서는, 곡면의 곡률 변화와 발광센서(Photodiode)의 발광 각도에 따른 곡면에서의 빛의 반사 특성 메커니즘을 분석하였다. 또한, 메커니즘 분석을 통하여 저렴한 상업용 적외선 센서로 곡면의 곡률 변화에 관계없이 거리측정이 가능함을 실험을 통하여 검증하고 그에 따른 결과와 거리 측정 방법을 제시하였다.

2. 곡면 메커니즘 분석

2.1 곡률이 출력전압 특성에 미치는 영향

곡면은 평면과 비교해서 반사, 산란, 흡수 등 빛의 광학적인 특성에 있어서 매우 복잡한 메커니즘을 가지고 있다. 비교적 저렴하고 쉽게 구입할 수 있는 상업용 적외선 거리측정 센서인 포토다이오드(Photodiode)와 수광센서(Phototransistor)는 제조사에 따라 발광각도와 수광각도에 차이가 있다. 따라서, 발광센서로부터 발광된 적외선은 레이저와 같은 직진성을 갖는 것이 아니라 발광각도로 인해 임의의 거리에서 특정 스폿 면적(Spot area)을 갖는다. 적외선 센서를 이용해 곡면에서 거리를 측정하기 위해서는 빛이 곡면에서 어떠한 메커니즘을 통해 작용하는지 먼저 살펴보아야 한다.

Yong Zhao의 연구에 따르면^[9], 곡면에서 반사되어 수광센서로 입사되는 빛의 강도는 식 (1)과 같다. k 는 빛의 강도와 측정물의 표면 반사계수와 관련된 상수이고 λ 는 빛의 파장이며 R_n 는 측정물의 표면 거칠기이다. 또한 θ 는 입사하는 빛과 측정물 표면의 수직선과 이루는 각도이며, θ_0 은 그 수직선과 반사하는 빛이 이루는 각도이다.

$$I(\theta) = \frac{1}{2\pi k \exp[-(4\pi R_n \cos\theta'_0/\lambda)^2]} \times \exp\left[-\frac{(\theta - \theta'_0)^2}{4\pi k^2 (\exp[-(4\pi R_n \cos\theta'_0/\lambda)^2])^2}\right] \quad (1)$$

또한, 곡면에서 반사되어 수광센서로 입사되는 복사플럭스(Φ)는 식 (2)와 같다.

$$\Phi = I(\theta)\Omega = \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta)d\theta \quad (2)$$

Fig. 1을 살펴보면 θ_1, θ_2 는 곡면에 조사된 빛이 수광센서로 입사될 수 있는 각도를 뜻하고 각각 식 (3)을 따르며, a 는 발광센서의 반지름이다. 또한, Ω 는 θ_1 과 θ_2 사이에 수광부로 들어오는 빛의 범위를 뜻한다.

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{d-a}{s}\right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{d+a}{s}\right)$$

곡면 중심에서 반사된 빛과 곡면 상에서 반사된 빛의 차이를 살펴보면 빛이 곡면 상에서 반사될 때, 수광센서와 곡면 상에서 빛이 반사된 지점까지의 거리 $s = s_0 + s_1$ 이기 때문에 곡면 중심보다 s_1

만큼 거리가 증가하게 된다. s_1 만큼의 거리증가는 식 (3)의 θ_1, θ_2 의 값을 각각 감소시키고 결국 식 (2)의 복사 플럭스 값이 감소하게 된다. 즉, 곡률을 갖는 임의의 곡면에서 빛이 어느 지점에서 반사되는지에 따라 수광센서로 입사되는 복사플럭스의 차이가 발생하고 이 차이로 인해 수광센서의 출력전압에 차이가 발생하게 된다.

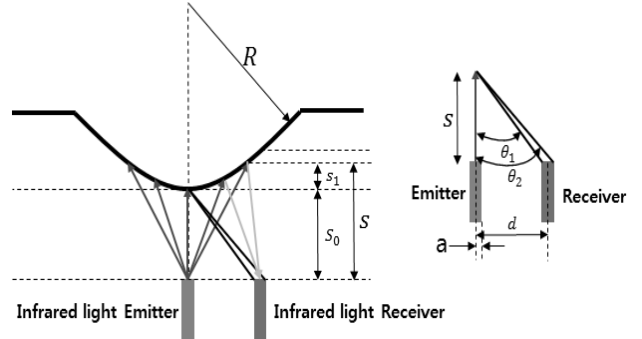


Fig. 1 Light reflection mechanism on the curved surface

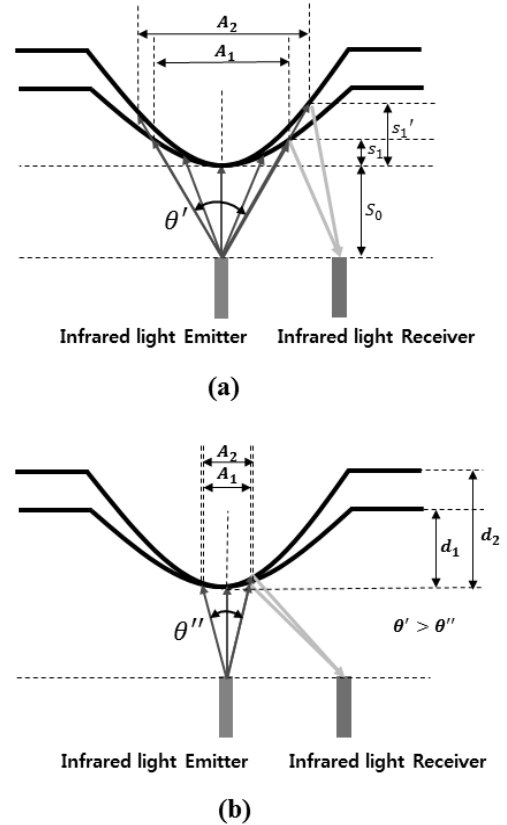


Fig. 2 Spot area difference on the curved surface according to emitted angle : (a) Spot area can also be formed by the curvature difference (b) Reducing emitted angle can minimize the spot area

Table 1 Spot area comparison from 4 to 9mm according to the curvature of curved surface and the emitted angle of the infrared light emitting sensor

| Measurement Distance(mm) | Emitted angle(4°) | | | Emitted angle(34°) | | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| | $d_1 = 1.57mm$ | $d_2 = 2.7mm$ | Percentage(%) | $d_1 = 1.57mm$ | $d_2 = 2.7mm$ | Percentage(%) |
| 4mm | 0.01531mm ² | 0.01530mm ² | 0.06532 | 1.19601mm ² | 1.20730mm ² | 0.94397 |
| 5mm | 0.03445mm ² | 0.03445mm ² | 0 | 2.71835mm ² | 2.76451mm ² | 1.69809 |
| 6mm | 0.06127mm ² | 0.06128mm ² | 0.01632 | 4.88816mm ² | 5.00805mm ² | 2.45266 |
| 7mm | 0.09576mm ² | 0.09580mm ² | 0.04177 | 7.72982mm ² | 7.98692mm ² | 3.32608 |
| 8mm | 0.13794mm ² | 0.13800mm ² | 0.04350 | 11.27277mm ² | 11.76196mm ² | 4.33957 |
| 9mm | 0.18779mm ² | 0.18790mm ² | 0.05858 | 15.55072mm ² | 16.40939mm ² | 5.52174 |

2.2 발광 각도가 출력 전압 특성에 미치는 영향 검증

발광센서의 발광각도는 임의 거리에서 특정 스폿 면적을 형성한다. Fig. 2(a)는 임의의 발광각도 θ' 을 갖는 발광센서를 곡면중심에 정렬시켰을 때의 그림이다. 그림을 살펴보면, 발광센서로부터 같은 방향으로 곡면에 조사된 빛이라도 곡면의 곡률 변화에 따라 $s'_1 - s_1$ 만큼의 거리 차이가 발생하게 된다. 또한 $s'_1 - s_1$ 만큼의 거리차로 인해 곡면상에 $A_2 - A_1$ 만큼의 스폿 면적에 차이가 발생하였음을 확인할 수 있다. 즉, 스폿 면적은 발광센서의 발광각도뿐만 아니라 곡률에 의해서도 변화될 수 있음을 Fig. 2(a)의 그림으로 확인하였다. 이러한 스폿 면적의 차이는 발광센서의 발광각도뿐만 아니라 2.1에서 분석한 곡률 메커니즘과 같이 미소거리 차이로 인해 발생할 수 있으며 결국 곡면에 반사되어 수광센서에 입사되는 적외선의 복사플럭스가 감소하게 되어 출력전압에 차이를 발생시킨다. 하지만, 반대의 경우로 생각하면 Fig. 2(b)와 같이 곡면의 곡률이 변하더라도 발광각도를 조절하여 곡면에 형성되는 특정 스폿 면적의 차이를 발생시키지 않는다면 미소거리 차이에 따른 곡률 메커니즘을 제거할 수 있다.

따라서 발광센서의 발광각도를 조절하여 곡률에 관계없이 곡면에 형성되는 스폿 면적을 최소화시켜 곡률 메커니즘을 제거 할 수 있다. Table 1은 발광각도 34°와 4°인 발광센서를 Fig. 2(b)와 같이 곡면 중심에 정렬시키고 곡률이 d_1 에서 d_2 와 같이 변화할 때 측정거리 4-9 mm에서 1 mm 간격으로 곡면에 형성되는 스폿 면적 넓이를 Solidworks^(TM)를 이용해 계산한 결과이며 발광각도 4°와 34°에서 각각 곡률이 d_1 에서 d_2 로 변화할 때 스폿면적이 몇 % 변화하였는지 수치적으로 보여주는 표이다. 실제로 발광센서의 발광각도를 34°에서 4°로 변경하게 되면 곡률이 변화하더라도 곡면 상에 형성되는 스폿 면적의 차이가 거의 없음을 수치적으로 확인하였다.

3. 실험 방법 및 실험 결과

3.1 측정 방법

측정물의 곡률변화와 발광센서의 각도변화에 따른 수광센서의

출력전압을 확인하기 위해 Polydimethylsiloxane (PDMS)로 제작한 곡면 형상의 챔버에 폴리머 튜브를 연결하고 수두차를 이용해 압력을 인가하였다. PDMS로 제작된 인공 챔버는 표면은 투명한 재질이며, 탄성계수는 약 300 ± 60 kPa이다. 각 수두별 압력을 10~50 mmHg까지 10 mmHg단위로 인가하였으며 Fig. 3(a)는 물을 채운 곡면 챔버의 사진이다. 인가된 압력이 증가될수록 챔버의 곡면 중심거리 (d')이 증가한다. Fig. 4는 각 압력에 따른 곡면 챔버의 형태와 곡률 변화를 보여주는 사진이다. 거리 측정 시 발광센서를 곡면 중심점에 정렬시키고, d' 의 증가를 고려하여 각 압력별 증가된 거리만큼을 발광센서로부터 이동시켜 압력과 관계없이 곡면 중심점과 발광센서 사이의 측정거리(d)를 일정하게 유지시켰다. 또한, 측정거리 4-9 mm를 1 mm간격으로 변화시키면서 각 거리에서 출력전압을 측정했고, 같은 실험을 10 mmHg간격으로 10~50 mmHg까지의 압력을 챔버에 인가해 곡률변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 수광센서는 곡면으로부터 반사된 빛을 온전히 수광하기위해 발광센서로부터 5 mm만큼 떨어진 거리에서 30° 만큼 기울였으며, 발광각도보다 넓은 수광각도 60°인 센서를 사용하였다. 사용된 센서의 광학적 특성 및 크기는 Table 2와 같다. 또한, 발광센서와 수광센서를 완전히 결속시키기 위해 $35 \times 40 \times 15$ mm³의 부피로 결합 모듈을 제작하였고 그 설계도는 Fig. 3(b)와 같다. 실제 실험에서는 1개의 수광센서를 사용하였으며 수광센서의 출력전압은 계측 장비인 DAQ 보드 (NI USB-6251, National Instrument)를 이용하였고 LabVIEW^(TM)를 통해 10kHz의 샘플링 주파수로 측정하였다. 또한 형광등 주파수인 60Hz를 차단하기 위해 저역통과필터의 차단 주파수를 60Hz로 설정하여 계측 신호를 필터링하여 측정하였다.

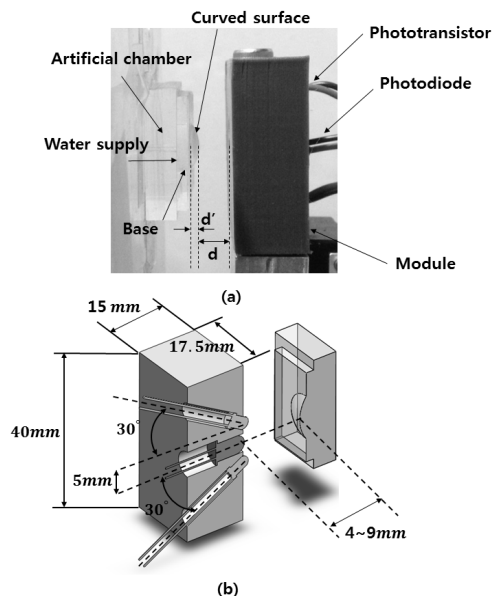


Fig. 3 Artificial chamber and module : (a) Picture of artificial chamber, (b) The inner schematic diagram of the module

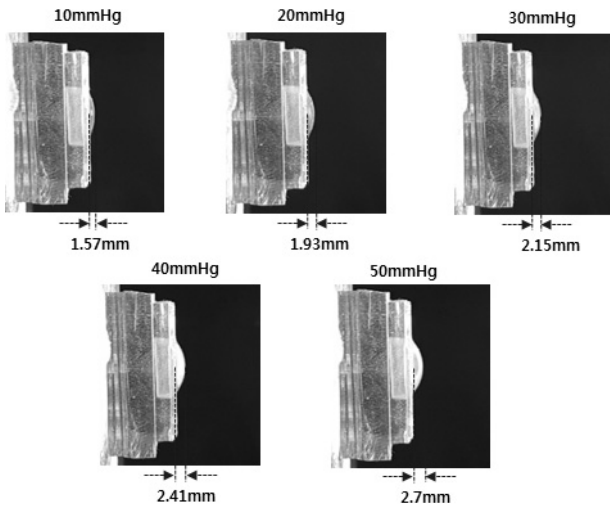


Fig. 4 difference of artificial chamber's shape according to pressure

Table 2 Sensor dimensions and optical properties

| | IR Sensor | | |
|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Photodiode | Photodiode | Phototransistor |
| Model name | MIPS3085P | EL-7L | ST-7L |
| Manufacturer | Optoelectronics | AUK Semiconductor | DAKWANG |
| Size | ∅ 5 | ∅ 3 | ∅ 3 |
| Supply voltage | 5 V | 5 V | 5 V |
| Output type | Analog voltage | Analog voltage | Analog voltage |
| Angle | 4° | 34° | 60° |
| Peak wavelength | 855 nm | 950 nm | 940 nm |
| Spectral bandwidth | 820~890 nm | 900~1000 nm | 840~1200 nm |

3.2 곡률 영향이 출력 전압 특성에 미치는 영향 검증

2.2에서 언급한 바와 같이, 곡면에서의 곡률 변화는 발광센서를 곡면 중심에 정렬시키고 곡면에 동일한 발광각도로 빛을 조사하였을 때, 측정거리에서 $s'_1 - s_1$ 만큼의 차이를 발생시키고 이 미소거리 차이로 인해 수광센서로 입사하는 복사 플럭스가 변화되어 수광센서의 출력전압에 차이가 발생한다.

Fig 5는 측정거리 4~9 mm까지 1 mm간격으로 거리를 변화시켰을 때 거리에 따른 출력전압 그래프를 나타내며 10~50 mmHg의 각 압력에서 거리에 따라 출력전압이 선형적으로 감소되는 것을 확인하였다. 동일한 거리에서 10~50 mmHg의 각 압력에서 출력전압을 비교해보면 압력에 따라 출력전압에 차이가 발생하였다. 또한 각 거리에서 10 mmHg일 때의 출력전압이 50 mmHg일 때보다 높은 경향성을 보인다. 예를 들어, 5 mm의 측정거리에서 챔버에 인가된 압력이 10 mmHg와 50 mmHg일 때 각각의 출력 전압은 4.59 V와 4.21 V이며 10 mmHg일 때의 출력전압이 50 mmHg일 때의 출력전압보다 0.38 V 더 높다. 이러한 결과는 압력이 증가하면 챔버의 중심 거리인 d' 이 증가하면서 곡률이 증가하게 되고 Fig. 2(a)와 같이 측정거리

$s'_1 - s_1$ 만큼의 차이가 발생하여 수광센서로 입사되는 복사플럭스가 감소하기 때문에 10 mmHg일 때의 전압이 50 mmHg일 때보다 높은 경향성을 보인다. 결국 곡률이 출력 전압 차이를 발생시키고 그 차이 때문에 Fig 4의 그래프에서 거리에 따른 출력전압이 겹쳐지는 부분이 발생한다. 예를들어, 5 mm에서 50 mmHg일 때의 출력 전압은 4.21 V로 6 mm에서 30 mmHg일 때의 출력전압 값과 동일하다. 즉, 동일한 출력 전압이 측정될 때, 5 mm인지 6 mm인지 거리를 구분할 수 없게 된다. 따라서 곡률이 변화하지 않는 물체에서는 거리변화에 따라 출력전압이 감소하므로 적외선을 이용한 거리측정이 가능하지만 곡률이 변화하는 물체에서는 곡률 영향을 제거하지 않는 한 적외선을 이용한 곡면에서의 거리측정은 불가능하다.

3.3 곡률 영향 최소화 방안

2.2에서 언급한 바와 같이 곡면상에 형성되는 스폿면적은 발광센서의 발광각도에 의해 발생하게 된다. 동일한 측정거리에서 스폿 면적의 차이는 2.1에서 언급한 미소거리만큼의 차이를 유발하고 곡면 메커니즘이 작용하게 되면서 출력 전압에 차이를 발생시킨다. 하지만, 반대의 경우로 발광센서의 발광각도를 적절히 조절하여 스폿 면적의 차이를 감소시킬 수 있다면 곡률변화에 따른 출력전압의 차이를 최소화시킬 수 있다.

곡면 상의 스폿 면적을 최소화하기 위해 발광각도가 4° 인 발광센서로 교체하여 3.1과 동일한 방식으로 실험을 진행하였다. Fig. 6은 발광각도 4°일 때 거리에 따른 출력전압을 나타내며 측정거리 5 mm부터 출력전압의 차이가 최소화 된 것을 확인하였다. 이는 2.2에서 예측한 바와 같이 곡률이 변화하더라도 발광각도를 조절하여 곡률에 따른 스폿 면적의 차이를 최소화함으로써 측정거리 미소거리만큼의 차이를 발생시키지 않으므로 곡률에 따른 출력전압의 차이를 최소화시킬 수 있음을 실험적으로 검증한 결과이다. 따라서 Fig. 5와 같이 각 거리에서 출력 전압이 겹쳐지는 부분이 발생하지 않으므로 발광각도를 조절하여 곡률에 관계없이 거리측정이 가능함을 실험을 통하여 검증하였다.

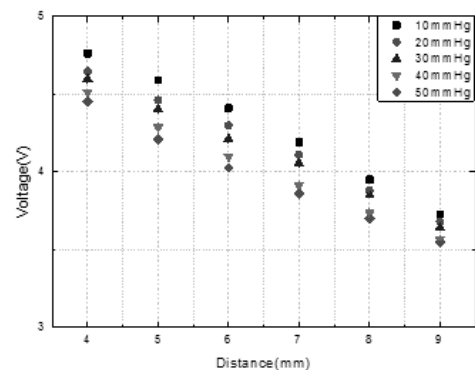


Fig. 5 Output voltage according to distance(emitted angle, 34°)

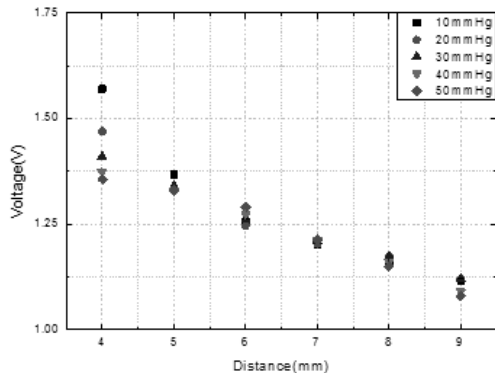


Fig. 6 Output voltage according to distance(emitted angle, 4°)

4. 결론

본 논문에서는 곡면에서 빛의 반사 메커니즘을 분석하여 곡면상에서 빛이 반사되는 지점에 따라 수광센서로 입사되는 빛의 강도가 다름을 확인하였다. 또한 곡률이 변화하게 되면 동일한 측정거리에서 미소거리만큼의 차이가 발생하여 이 차이로 인해 복사플럭스의 차이가 발생하므로 출력전압의 차이가 발생함을 실험을 통해 검증하였다. 이로 인해, 거리에 따른 출력전압이 겹쳐지며 거리가 다름에도 곡률에 따라 같은 전압값이 측정되어 거리 측정이 불가능하였다. 이는 곡률에 의한 영향으로 발광센서의 발광 각도를 조절하여 곡률에 따른 스폿면의 차이를 최소화함으로써 출력전압 차이를 최소화할 수 있음 확인하였다. 측정거리 5 mm에서 발광각도가 34°인 경우에 10 mmHg와 50 mmHg의 전압차는 0.38 V이고 4°인 경우는 0.02 V로 4°인 경우가 34°에 비해 출력전압차를 최소화하였음을 실험적으로 검증하였다. 따라서, 본 논문에서는 저렴한 가격으로 쉽게 구입할 수 있는 적외선센서를 이용하여 곡률에 관계없이 곡면에서 거리측정이 가능함을 이론과 실험을 통해 검증하였다. 하지만, 곡면 중심에 발광센서를 정렬시켜야 한다는 한계점을 가지고 있다. 또한, 적외선센서가 근거리 센서라는 점과 측정대상이 평면이 아닌 곡면임을 고려하여 적외선센서를 사용하여 곡면에서도 거리측정이 가능함을 입증하기 위한 기초 실험으로써 측정거리를 4-9mm로 1mm 간격으로 비교적 짧은 측정거리를 설정하였다. 서론에서 언급한바와 같이 다양한 산업분야에 활용될 수 있도록 앞서 언급한 한계점이 후속연구를 통해 극복되어야 한다.

References

- [1] Chung, C. S., 2017, ICT Governance Restructure Plan in the era of 4 th Industrial Revolution, Journal of platform technology 5:1 33-40.
- [2] Lin, Y., Huan, Z., Han, D., 2017, Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes, Robotics and computer-integrated manufacturing 48 59-72.
- [3] Wang, J., Xie, J., Zhao, R., Zhang, L., Duan, L., 2017, Multisensory fusion based virtual tool wear sensing for ubiquitous manufacturing, Robotics and computer-integrated manufacturing 45 47-58.
- [4] Chae, W. Y., Lee, K. J., Kim, H. J., 2010, Distance measurement system using the infrared sensor for mobile robots, Proceedings of KIIS spring conference 20:1 376-379.
- [5] Tarek, M., 2009, Using ultrasonic and infrared sensors for distance measurement, Transport 2925 8507.
- [6] Shan, Y., Speich, J. E., L, K. K., 2008, Low-cost IR reflective sensors for submicrolevel position measurement and control IEEE/ASME transactions on mechatronics 12:6 700-709.
- [7] Novotny, P. M., Ferrier, N. J., 1999, Using infrared sensors and the phong illumination model to measure distances, Proceedings IEEE international conference 2 1644-1649.
- [8] Lee, J. Y., A, J., Chua, C. K., 2017, Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, Applied materials Today 7 120-133.
- [9] Zhao, Y., Li, P., Wang, C., Pu, Z., 2000, A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement, Sensors and Actuators A : Physical 86:3 211-215.