ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 18-04-04
22

j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.22,No.4,907~915,December 2018
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2018.22.4.907

다중노출 출력과 HDR 기법을 이용한 적외선 근접센서 측정 범위 향상 방법

Improving measurement range of infrared proximity sensor using multiple exposure output and HDR technique

조 세 형*★

Se-Hyoung Cho*★

Abstract

This paper proposes a method to improve the performance of low cost infrared distance sensor. Infrared distance sensor measures the intensity of reflected light and converts it into distance. The proposed method improves the sensing distance of the sensor and makes it operate robustly in various lighting environments. This is achieved by extracting the characteristic curves of the sensor and applying the HDR (High Dynamic Range) technique. The output value of the sensor was obtained by varying the intensity of the infrared input and the exposure time, and the characteristic curve of the sensor was extracted from it.

요 약

본 논문에서는 저가형 적외선 거리 센서의 성능을 개선하는 방법을 제안한다. 적외선 거리 센서는 반사광의 강도를 측정하여 거리로 환산한다. 제안하는 방법은 센서의 감지 거리를 개선하고 다양한 조명환경에서도 강인하게 동작하도록 한다. 이는 센서의 특성곡선을 추출하고 이를 바탕으로 HDR(High Dynamic Range) 기법을 적용함으로써 가능해졌다. 적외선 입력의 세기와 노출 시간을 다양하게 변화시켜서 센서의 출력값을 획득하였고 이로부터 센서의 특성곡선을 추출하였다.

Key words : Infrared sensor, Displacement sensor, Range sensor, HDR, High dynamic range

Ⅰ. 서론

라이다(Light Detection And Ranging)는 레이저 빔을 주변에 발사하고 되돌아오는 시간을 측정하여 주변의 지형에 대한 정보를 감지하고 이를 3D 지도로 만들어내는 기술이다. 우주탐사, 지구 지형 및 환경 관측을 위한 항공 산업과 더불어 자율주행 및 무인 자동차에 라이다가 핵심 부품으로써 활용되고 있다[1], [2]. 또한 ICT 기술과의 융복합을 통해 로봇, 드론, 공장 자동화 및 무인화, 측량/영상 정보처리 산업 등 다양한 분야에서 활용 가능하며, 저가의 소형 제품을 양산함으로써 라이다 시장 확대가 가능할 것으로 전망된다. 최근 스마트카 산업의 관심도가 높아짐에 따라 모바일 라이다에 대한

* Division of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sunmoon University
★ Corresponding author
E-mail : chosh@sunmoon.ac.kr, Tel : +82-41-530-2316
※ Acknowledgment
Manuscript received Oct. 8, 2018; revised Oct. 25, 2018; accepted Oct. 30, 2018
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

관심도와 규모가 커지는 추세이며, 이에 따라 센서의 원리와 응용 방법에 대한 이론적인 교육에 대한 수요가 증가하고 있다.

그러나 라이다 교육 및 실습을 위한 환경을 구축하는 데는 큰 경제적인 어려움이 따른다. 모바일 라이다의 경우 현재 상용화된 제품이 많지 않고, 일부 기업이 라이다 센서 기술을 독점하고 있어 가격대가 높은 편이다. 최근에는 라이다의 상용화를 위해 저가격화 및 소형화에 집중한 기술개발을 통해 대량 생산이 가능한 제품 개발이 되고 있고 몇몇 중소기업이 차량용 라이다를 생산하고 있지만, 양산 단계는 아니다. 따라서 대학의 로봇공학 실습 교육에서 이러한 애로에 대한 대안 모색이 필요하다[3], [4].

본 연구에서는 교육용 수준으로 성능을 낮춘 저가의 센서 개발 요구에 대응하고자 라이다를 대체하여 교육용 모바일 로봇에 활용할 수 있는 적외선 거리 측정 센서를 개발하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 센서는 HDR(High Dynamic Range) 기법을 적용하여 통상의 적외선 근접센서가 갖는 짧은 측정 범위와 외란광에 취약하다는 단점을 보완하였다. 제안한 센서는 약 1m 이내의 거리를 측정할 수 있다.

II. 본론

1. 저가형 1차원 거리 센서 개관

라이다와 같은 방사형 거리 센서 개발에는 1차원 거리 센서를 이용할 수 있다. 표 1에는 1차원 거리 센서의 전형적인 사양을 나타내었다. 본 연구는 적외선 센서의 활용을 염두에 두고 성능을 개선하려고 한다. 적외선 반사광의 세기를 이용한 거리 센서는 정확한 측정에 한계가 있으나 감지하고자 하는 물체의 반사율에 대한 정보를 사전에 알면 유용한 거리 측정 수단으로 활용할 수 있다. 따라서 반사율을 미리 알고 있는 물체를 이용하여 SLAM (Simultaneous localization and mapping), 자율주행 실습이 가능하다. 또한 저가, 고속이며 동작 원리가 단순하여 입문자의 교육에 활용하기 좋다. 개발한 센서의 적용 대상으로 고려한 라인트레이서 로봇은 실시간 모터 제어 실습을 위해 1ms의 짧은 제어 주기를 가지는 시스템이어서 적외선 센서만이 이러한 스캐닝 속도를 만족한다. 다른 센서 모듈은 지연시간이 20~50ms가량으로 길어서 실시간성이 떨어지며 방사형 센서를 만들기 위해 여러 개를 배열로 구성했을 때는 가격 면에서 곤란한 점이 있다. 적외선 PSD(Position Sensitive Device) 모듈은 내부에 포토다이오드 어레이와 프로세서를 내장하여 삼각측량하기 때문에 물체의 반사율에 따른 영향이 매우 적으나 처리 속도가 느리고 비싸다. 반면 적외선 반사광의 세기를 이용한 방식은 반응 속도가 빠르고 가격이 매우 저렴해서 교육용으로 구성하는 데 부담이 없다. 초음파 센서는 음파를 이용하기 때문에 여러 개의 센서를 동시 작동할 수 없으며 어레이로 구성할 경우 측정 주기가 현저히 길어지게 된다. 적외선 반사광량식은 어레이로 구성 시 인접한 센서의 동시 동작만 피하면 간섭을 피할 수 있으므로 낮은 지연시간, 높은 스캔 속도와 저가의 조건을 모두 만족한다.

Fig. 1. Low cost 1D displacement sensors(Infrared reflection, Infrared triangulation, Ultrasonic, Laser TOF).
그림 1. 저가 1차원 거리 센서(적외선 반사식, 적외선 삼각측량식, 초음파, 레이저 ToF)

Table 1. Low cost 1D displacement sensors.
표 1. 저가 1차원 거리 센서

Sensor type	Cost	Simultaneous operation	Processing time	Maximum distance
Infrared (Reflection)	Low	Yes	0.1ms	30cm~1m
Infrared (Triangulation)	High	No	50ms	30cm~5m
Ultrasonic	Low	No	>3ms (50cm)	5m
Laser ToF	High	Yes	>20ms	2m

2. 적외선 센서 관련 기술

포토다이오드, 포토트랜지스터와 같은 적외선 수광소자는 회로가 간단하여 교육용으로도 자주 활용되고 있다. 측정 대상물에 반사된 광의 세기를 측정하면 대상물까지의 거리를 확인할 수 있다. 이를 위해서는 조명, 측정 대상의 반사율, 측정 거리에 따른 비선형적 반사광 세기 변화를 고려해야 한다.

태양광, 실내등과 같은 조명은 위치와 방향에 따

라 다른 밝기로 보이므로 일관된 측량을 어렵게 한다. 이러한 외부 조명의 영향을 상쇄하기 위해서 가시광선을 차단하고 적외선만 통과하는 광학필터를 사용할 수 있다. 이때 형광등과 같은 차가운 실내조명의 영향은 효과적으로 차단할 수 있지만, 무대조명과 같이 적외선을 많이 내는 뜨거운 조명이나 태양광은 완전히 차단하지 못한다. 이런 경우 외부 조명에 비해서 강한 측정용 자체 조명과 낮은 감도의 센서를 사용하면 어느 정도 극복이 가능하지만, 측정 대상이 멀리 있어서 반사광의 세기가 약할 때는 효과적인 방법이 아니다. 그런데 그림 2와 같은 회로로 조명을 점멸하면 문제를 상당히 해결할 수 있다. 외부조명은 일반적으로 120Hz 이하의 밝기 변화 속도를 보이므로 측정용 조명을 점멸하여 수십 kHz의 높은 주파수 성분을 가지게 하고 측정한 신호의 포락선을 검출하면 외부 조명의 영향을 상당 부분 상쇄할 수 있다. 이때 외부 조명에 의한 DC 성분과 측정 조명에 의한 펄스 성분이 섞여 있으므로 하이패스 필터를 이용하면 된다.

그림 3은 구형파 모양의 조명 구동 신호와 수광회로의 출력 전압을 보여준다. 조명을 구동한 후 10us 후에 수광회로의 출력전압이 최대값에 도달하므로 이 시점에서 AD 변환을 수행하면 포락선의 값을 얻을 수 있다. 이때 센서의 상승시간이 짧은 것이 유리하다. 측정용 조명에 의한 신호 변화가 외부조명 변화 속도에 비해서 빠른 편이 좋기 때문이다. 또한 센서 여러 개의 동작을 인터리빙하는 경우 측정 후의 휴지시간(하강시간)이 길어지더라도 측정에 걸리는 시간(상승시간)이 짧은 것이 측정 속도를 빠르게 하는 데 유리하다. 포토트랜지스터 회로 구성은 공통 컬렉터, 공통 이미터, 캐스케이드 구성이 가능하다[5]. 그중 그림 2와 같은 공통 컬렉터 구성이 밀러 효과를 줄이므로 상승시간이 빠르다. 캐스케이드 구성은 상승시간과 하강시간을 모두 줄일 수 있으나 상승시간이 공통 컬렉터 구성일 때보다 약간 길어지고 주변 회로 구성이 좀 더 복잡해지는 단점이 있다.

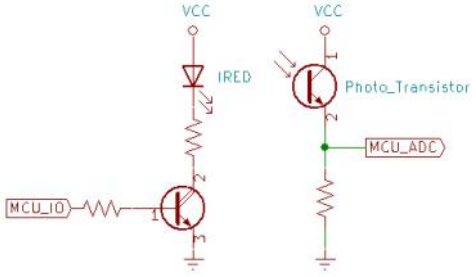


Fig. 2. Schematic of the light emitting part and the light receiving part of the infrared sensor module.
그림 2. 적외선 센서 모듈의 발광부와 수광부 회로도

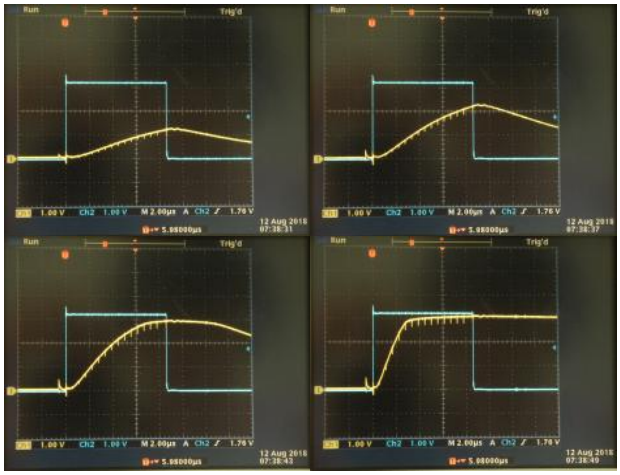


Fig. 3. Phototransistor output waveform by reflected light intensity. The output waveform of the phototransistor was obtained by varying the distance between the infrared sensor module and the object in the absence of external light.
그림 3. 반사광 세기별 포토트랜지스터 출력 파형. 외부 조명이 없는 상태에서 적외선 센서 모듈과 물체 사이의 거리를 달리하여 포토트랜지스터의 출력파형을 얻었다.

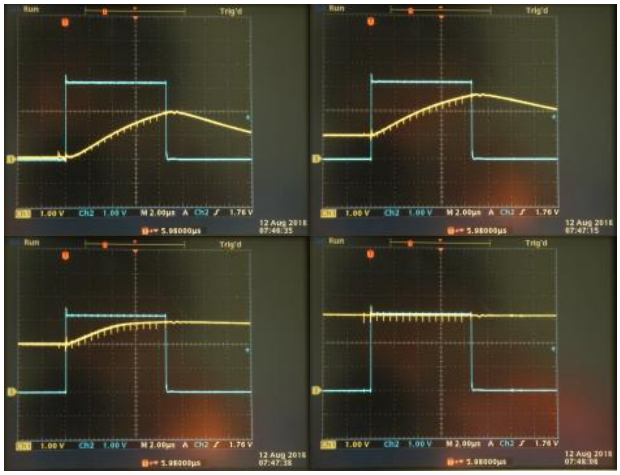


Fig. 4. Phototransistor output waveform by external illumination intensity. The distance between the infrared sensor module and the object was fixed, and the output waveform of the phototransistor was obtained by varying the distance between the external light and the object.
그림 4. 외부조명 세기별 포토트랜지스터 출력 파형. 적외선 센서 모듈과 물체 사이의 거리는 고정하고 외부 조명과 물체 사이의 거리를 달리하여 포토트랜지스터의 출력파형을 얻었다.

3. 적외선 센서의 강인한 동작을 위해 고려할 사항

측정하고자 하는 반사광이 세지 않고 외부 조명이 약한 경우 앞서 언급한 정도의 설계로도 충분하다. 그러나 거리 측정 용도로 사용할 때는 측정 거리 변화에 따른 비선형적 반사광 세기 변화로 말미암아 매우 강하거나 약한 반사광을 측정해야 한다. 또한 외부 조명이 강한 경우 센서의 동작 영역이 크게 변하므로 센서의 전체 동작 영역의 특성을 고려하여야 강인한 측정이 가능하다. 반사광의 세기가 약할 때는 조명의 점등 시간을 길게 하는 편이 신호의 크기를 크게 할 수 있어서 유리하고 반사광의 세기가 셀 때는 조명의 점등시간을 짧게 하는 편이 센서의 포화영역을 피할 수 있어서 유리하다. 그림 3은 외부 조명이 없는 상태에서 측정용 조명에 의한 센서의 출력 전압을 보여준다. 발광 다이오드에서 나온 펄스 적외선은 물체 표면에서 반사되어 포토트랜지스터에 감지되는데 적외선 센서 모듈과 물체 사이의 거리를 달리하여 포토트랜지스터의 출력 파형을 얻었다. 0v 근처에서는 기울기가 완만하지만, 전압이 상승함에 따라 기울기가 가파르게 변하며 그 이후 기울기가 다시 완만해져 포화영역에서는 거의 평탄해진다. 반사광의 에너지는 세기와 시간의 곱으로 표현할 수 있는데 센서의 출력 전압이 여기에 정비례하지 않으므로 반사광이 세면 비선형성의 영향을 많이 받게 된다. 그림 4는 측정용 조명에 의한 반사광의 세기를 일정하게 한 상태에서 외부 조명의 세기를 달리하였을 때의 센서 출력 전압을 보여준다. 적외선 센서 모듈과 물체 사이의 거리는 일정하게 하고 백열전구와 물체 사이의 거리를 다양하게 하여 포토트랜지스터의 출력파형을 얻었다. 외부 조명이 있으면 측정용 조명이 켜지기 전부터 센서의 출력 신호 레벨이 높은 상태에 있게 된다. 센서 특성함수의 기울기는 레벨에 따라서 변한다. 외부 조명이 세질수록 측정용 조명에 의한 센서값의 변화가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 외부 조명이 매우 강해지면 포토트랜지스터의 출력이 항상 포화된 상태가 되므로 측정용 조명에 의한 센서값 변화가 나타나지 않게 된다. 이와 같은 센서의 특성 곡선을 고려하지 않고 아날로그 하이패스 필터를 사용하면 같은 세기의 점멸광을 받아도 외부 조명이 강할 때는 필터의 출력 펄스의 높이가 낮아지게 된다. 따라서 강인한 측정을 위해서는 센서의 특성 곡선을 이용해야 한다.

4. 적외선 센서의 HDR을 위한 특성함수 추정

HDR 영상 기술은 카메라의 특성함수를 고려하여 노출을 달리한 여러 장의 이미지를 합성하여 이미지의 밝기 표현 범위를 향상하는 기술이다. 적외선 센서에 HDR 기술을 적용하기 위하여 먼저 적외선 센서의 특성함수를 근사하고 노출 정도를 다르게 한 센서 데이터를 여럿 얻은 다음 이를 융합하는 과정이 필요하다. HDR 이미지 처리는 카메라를 이용하므로 몇 장의 사진만으로도 카메라 특성함수를 추정하는 데 필요 한만큼의 픽셀 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 적외선 센서는 활용하는 개수가 많지 않으므로 특성함수를 추정하기 위해서 충분한 시간 동안 많은 횟수의 샘플링이 필요하다. 특성함수를 스캐닝하여 구할 수도 있지만 스캔하는 동안 적당한 노출을 장시간 유지해야 하며 강한 반사광과 약한 반사광 모두에 적당한 노출이 존재하지 않는 경우가 대부분이므로 실용적이지 않다. 따라서 임의의 반사광 세기 및 노출 시간으로부터 얻은 데이터를 이용하는 방법을 구현하였다.

포토트랜지스터 회로의 출력 전압은 MCU(Micro Controller Unit) 내장 ADC(Analog to Digital Converter)로 고속 연속 변환한다. 그림 3과 4에 나타나는 수신부 전압의 글리치 노이즈는 샘플링 시점에서 샘플링 커패시턴스에 의한 것이다. 변환은 측정용 조명이 점등된 10us 동안 같은 시간 간격으로 16번 이루어진다. 측정용 조명의 점등 시점에서 유도 노이즈가 발생하므로 외부 조명에 의한 전압을 측정하기 위해서 점등 시점보다 약간 앞서서 변환을 시작하도록 하고 점등 시점의 노이즈가 포함된 두 번째 데이터는 버린다.

적외선 센서의 감도를 변경하는 방법으로는 포토트랜지스터의 부하저항의 크기를 가변하는 방법과 다중이득 증폭기를 사용하는 방법, 노출 시간을 다르게 하는 방법이 있다. 앞의 두 가지 방법은 감도를 다르게 하여 얻은 여러 전압값을 동시 샘플링하기 위하여 많은 수의 샘플링 회로가 필요하므로 회로가 복잡해진다. 반면 근래에는 일정 횟수의 연속 샘플링을 고속으로 할 수 있는 ADC를 내장한 저가 MCU가 많이 출시되어서 주변 회로를 간단히 할 수 있다. 따라서 같은 세기의 빛에 대해서 노출 시간이 다른 센서값 여러 개를 쉽게 얻을 수 있다. 이어지는 내용에서는 노출 시간이 다른 센서값 여러 개를 융합하여 동적 영역이 넓어지는 효과를 얻

는 방법을 소개한다.

적외선 센서에 약한 빛이 들어올 때는 장시간 노출하는 것이 신호 값이 크게 나와서 SNR(signal-to-noise ratio)이 좋게 된다. 반면 강한 빛이 들어올 때는 노출 시간이 짧을 때의 값이 적정 범위로 나타나고 장시간 노출했을 때의 샘플 값은 포화하여 거의 쓸모없게 된다.

포토트랜지스터가 입력받은 에너지의 총량은 빛의 밝기와 시간의 곱이므로 센서 출력 전압 또는 ADC 결과값과의 함수관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = r \cdot t = f(z) \tag{1}$$

Q는 센서에 들어온 적외선 광량(에너지), r은 적외선 광속(세기), t는 노출 시간, z는 적외선 수신부의 출력 전압을 나타낸다. $f()$는 포토트랜지스터와 주변 회로의 특성함수이다. HDR을 위해서 카메라 특성 함수를 근사하는 방법에 대한 연구가 진행되었다[6]-[9]. 이중 특성함수를 N차 다항함수를 이용하여 근사하는 방법이 유용하다.

$$r \cdot t = f(z) = \sum_{i=0}^{N} c_i z^i = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + \cdots + c_N z^N \tag{2}$$

적외선 조명을 켠 후 10us 동안 지속하면서 연속 샘플링을 수행하면 반사광의 세기 r은 같으면서 노출 시간만 다르게 한 센서 출력값을 얻을 수 있다. 이때 각 샘플의 노출 시간을 알고 있으므로

$$\begin{aligned} r_1 \cdot t_0 &= f(z_0) = c_0 + c_1 z_0 + c_2 z_0^2 + \cdots + c_N z_0^N \\ r_1 \cdot t_1 &= f(z_1) = c_0 + c_1 z_1 + c_2 z_1^2 + \cdots + c_N z_1^N \\ r_1 \cdot t_2 &= f(z_2) = c_0 + c_1 z_2 + c_2 z_2^2 + \cdots + c_N z_2^N \\ &\vdots \\ r_1 \cdot t_M &= f(z_M) = c_0 + c_1 z_M + c_2 z_M^2 + \cdots + c_N z_M^N \end{aligned} \tag{3}$$

와 같다. 반사광의 세기 r_1에 대해서 연속 샘플링으로 15개의 센서 출력값을 얻으므로 $M = 15$로 하였다.

이때 반사광의 세기 r_1의 값은 알 수 없으므로 다음과 같이 소거하여 $M-1$개의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} &c_0(t_1 - t_0) + c_1(t_1 z_0 - t_0 z_1) + c_2(t_1 z_0^2 - t_0 z_1^2) \\ &+ \cdots + c_N(t_1 z_0^N - t_0 z_1^N) = 0 \\ &c_0(t_2 - t_1) + c_1(t_2 z_1 - t_1 z_2) + c_2(t_2 z_1^2 - t_1 z_2^2) \\ &+ \cdots + c_N(t_2 z_1^N - t_1 z_2^N) = 0 \\ &\vdots \\ &c_0(t_M - t_{M-1}) + c_1(t_M z_{M-1} - t_{M-1} z_M) \\ &+ c_2(t_M z_{M-1}^2 - t_{M-1} z_M^2) + \cdots \\ &+ c_N(t_M z_{M-1}^N - t_{M-1} z_M^N) = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

반사광의 세기는 $r_1 \sim r_P$, P가지로 다양하게 하여 각각 $M-1$개의 식을 얻는다. $P = 2500$으로 하였다. 반사광의 세기 r의 값은 알 수 없으므로 센서의 최대 출력값을 1로 정규화하고 이때의 빛 에너지의 크기를 1로 두면

$$Q_{\max} = 1 = c_0 + c_1 + c_2 + \cdots + c_N \tag{5}$$

을 얻는다. 이를 회귀분석을 통해 풀기 위해서 행렬로 정리하면 다음과 같다.

$$Y = XC \tag{6}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$X_0 = [1 \quad 1 \quad 1 \cdots 1] \tag{9}$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} t_1 - t_0 & t_1 z_0 - t_0 z_1 & t_1 z_0^2 - t_0 z_1^2 & \cdots & t_1 z_0^N - t_0 z_1^N \\ t_2 - t_1 & t_2 z_1 - t_1 z_2 & t_2 z_1^2 - t_1 z_2^2 & \cdots & t_2 z_1^N - t_1 z_2^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_M - t_{M-1} & t_M z_{M-1} - t_{M-1} z_M & t_M z_{M-1}^2 - t_{M-1} z_M^2 & \cdots & t_M z_{M-1}^N - t_{M-1} z_M^N \end{bmatrix} \tag{10}$$

$X_2, \cdots X_P$는 X_1과 같은 형태이며 각각 반사광 세기 $r_2 \sim r_P$에 의해 얻은 행렬이다. 이들을 결합하여 X를 구한다.

$$X = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_P \end{bmatrix} \tag{11}$$

그리고 회귀하여 특성함수의 계수를 구한다.

$$C = (X^T W X + \lambda I)^{-1} (X^T W Y) \tag{12}$$

λ는 과적합을 방지하는 정규화 계수이며 W는 가중치이다. $Q_{\max}$가 1이 아니라 다른 값이 되도록 C의 크기를 다양하게 조정하면 그림 5와 같은 포토트랜지스터 특성함수를 얻는다.

그림 5는 근사한 특성함수의 역함수, $f^{-1}()$이다. 그림 3, 4의 오실로스코프 화면과 축을 같게 하기 위하여 역함수로 표현하였다. 가는 선으로 표시한 곡선은 회귀에 사용한 데이터이며 다양한 반사광

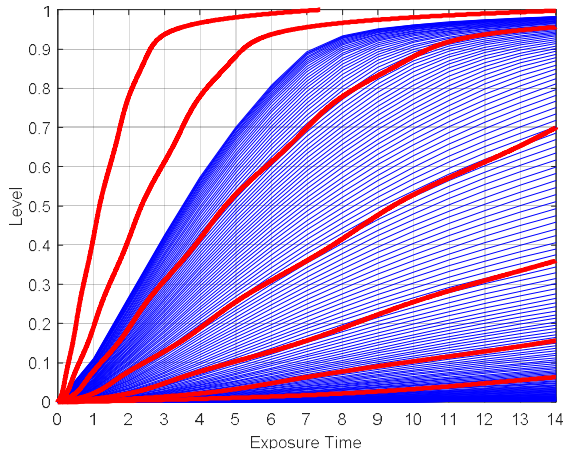


Fig. 5. Characteristic curve of phototransistor.
그림 5. 포토트랜지스터의 특성곡선

세기 $r_1 \sim r_P$에 대해서 습득하였다. 굵은 선으로 표시한 곡선은 회귀 결과 얻은 특성함수이며 회귀분석 입력으로 사용한 곡선을 근사한다. 입력 데이터를 얻을 때의 반사광보다 더 센 반사광에 대한 센서 출력도 예측할 수 있다.

카메라의 특성함수는 기울기 변화가 심하지 않아서 5차 다항식으로 근사하였으나[6] 포토트랜지스터는 포화영역 근처에서 기울기 변화가 심하여 특성함수를 11차 다항식으로 근사하였다. 이를 이용하면 센서 출력값으로부터 실제 반사광의 세기에 비례하는 값을 추정할 수 있다. 카메라는 한 장의 사진에 수많은 픽셀이 존재하여 적은 수의 이미지만으로도 특성함수 추정이 가능하였지만 적외선 센서는 한 개 또는 소수의 센서로부터 여러 번 샘플링해서 다양한 반사광 세기에 대한 센서 출력값을 획득해야 한다. 데이터의 크기를 카메라 특성함수 추정에서와 비슷하게 하기 위하여 2500가지의 각기 다른 반사광 세기를 활용하였다. $r_1 \sim r_{2500}$에 대해서 각각 15개의 노출 시간 $t_0 \sim t_{14}$를 비교하여 14개의 식을 얻었다. 이들을 결합한 35001행의 행렬로부터 특성함수 근사 다항식의 11개 계수를 구하였다. 센서 출력값으로부터 실제 반사광의 세기를 구하기 위해서는 11차 다항식의 계산이 필요하다. 이는 MCU에서 많은 시간이 소요되므로 미리 룩업 테이블을 작성하면 된다. 특성함수의 정의역은 12비트 ADC의 출력값 범위로 0~4095이고 특성함수의 결과값을 4바이트 단정도 실수형을 이용하여 표현하면 16킬로바이트로 특성함수를 근사할 수 있다.

5. 적외선 센서의 특성함수를 이용한 HDR 값 계산

특성함수로부터 반사광의 광량(에너지)을 구하고 이를 노출 시간으로 나누면 반사광의 세기를 추정할 수 있다.

$$r_m = \frac{f(z_m)}{t_m} \tag{13}$$

r_m은 m번째로 샘플링한 ADC 데이터를 이용해서 추정한 반사광의 세기이다. 그림 6은 노출 시간이 0인 샘플링 시점을 제외한 나머지 14개 시점의 센서 출력값으로부터 구한 반사광의 세기를 나타낸 것이다. 이 값들이 대체로 비슷한 크기임을 확인할 수 있다.

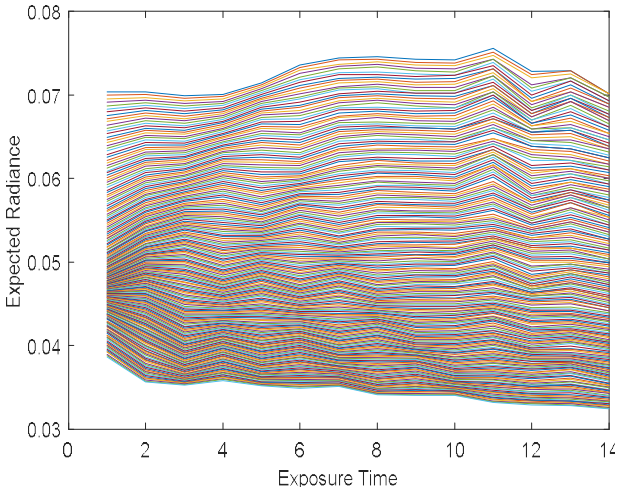


Fig. 6. Estimated Radiance by Exposure time.
그림 6. 노출 시간에 따른 반사광 세기 추정치

이상적인 경우 15개의 데이터로부터 얻은 추정이 같은 값을 가져야 하나 실제로는 특성함수의 오차, 측정 노이즈의 영향으로 약간 다른 값이 얻어지며 신뢰할 수 있는 정도도 각각 다르다. 특성함수 $f(z)$의 기울기가 완만한 곳은 정확한 추정이 가능하고 기울기가 급한 곳은 센서 출력값 z에 노이즈가 적게 포함되어도 추정한 적외선 광량이 크게 변해서 부정확하게 된다. 또한 센서 출력값이 작으면 SNR이 좋지 못해서 부정확하게 된다. 센서 출력값이 중간 정도일 때는 특성함수 $f(z)$의 기울기도 완만하게 나오고 신호의 세기도 커서 측정이 정확하게 된다. 정확도에 따라서 가중치를 다르게 설정하여 평균을 내면 항상 정확한 적외선 세기를 얻을 수 있다.

$$r = \frac{\sum_{m=1}^{M} r_m w_m}{\sum_{m=1}^{M} w_m} \tag{14}$$

w_m은 추정한 값이 얼마나 정확하고 신뢰할 만한지에 따라서 부여한 가중치이다. r은 HDR 기법으로 최종 추정한 반사광 세기가 된다. 가중치를 정하는 방법은 다양한데 본 연구에서는 특성함수의 기울기 값을 가중치를 구하는 데 활용하였다. 포화영역과 값이 작은 영역 모두 특성함수의 기울기가 급하다. 특성함수의 도함수 역시 빠른 처리를 위하여 룩업 테이블을 작성하였다.

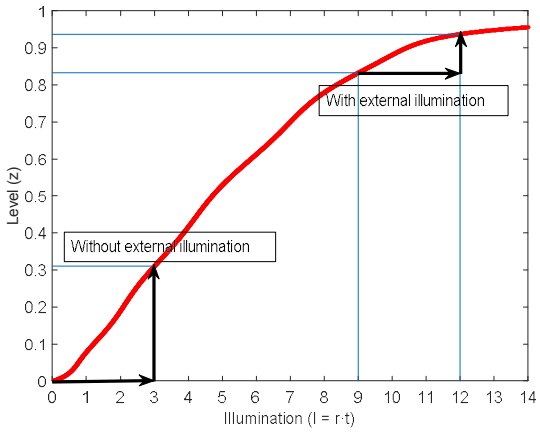


Fig. 7. Sensor output variation with external illumination.
그림 7. 외부 조명에 따른 센서 출력 변화

그림 7은 특성함수의 역함수, $f^{-1}()$에 외부 조명이 있을 때와 없을 때의 센서 출력을 나타낸 것이다. $f(z_0)$는 점멸 조명을 켜기 전 외부 조명에 의한 반사광의 세기를 나타내므로 단순히 빼면 외부 조명의 효과가 상쇄된다. 따라서 식 13을 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$r_m = \frac{f(z_m) - f(z_0)}{t_m} \tag{15}$$

이렇게 하면 외부 조명에 의해서 적외선 센서의 동작 영역이 변하고 점멸조명에 의한 센서 출력 펄스 높이가 달라지더라도 특성곡선을 통해서 적외선 반사광의 세기를 정확하게 측정할 수 있다.

그림 8은 센서를 반사판으로부터 멀리 이동하면서 센서 출력값을 구한 것이다. 가는 선으로 표시된 그래프는 HDR을 사용하지 않은 것인데 노출

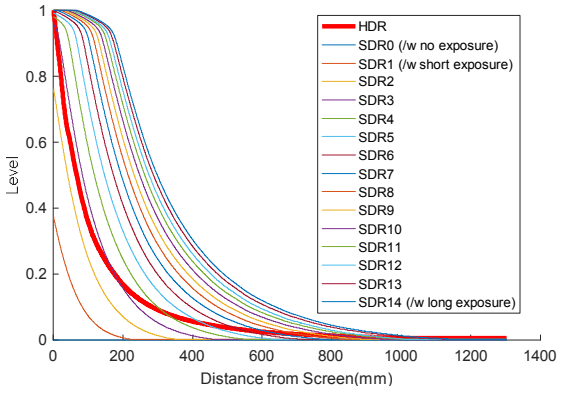


Fig. 8. Output of phototransistor according to measurement distance.
그림 8. 측정거리에 따른 포토트랜지스터의 출력

Table 2. Distance detection range according to exposure time.
표 2. 노출 시간에 따른 거리 감지 범위

	Exposure time (us)	Minimum detectable distance (mm)	Maximum detectable distance (mm)	Detectable range (mm)
SDR1	0.7	0	183	183
SDR2	1.4	0	308	308
SDR3	2.1	0	408	408
SDR4	2.9	0	491	491
SDR5	3.6	0	566	566
SDR6	4.3	0	635	635
SDR7	5.0	10	695	685
SDR8	5.7	22	750	728
SDR9	6.4	32	800	768
SDR10	7.1	40	850	810
SDR11	7.9	51	895	844
SDR12	8.6	56	926	870
SDR13	9.3	64	997	933
SDR14	10.0	68	1021	953
HDR	0.7~10.0	0	1021	1021

시간별로 다른 곡선을 보여준다. 노출 시간이 짧은 경우는 반사판에서 조금만 멀어져도 센서값이 작게 나와서 곤란하다. 노출 시간이 긴 경우는 근거리에서 센서 출력이 포화하여서 거리 측정을 제대로 할 수 없다. 표 2에는 노출 시간별로 측정 가능한 거리 범위를 나타내었다. 최소 탐지 가능 범위는 센서 출력이 포화하지 않는 최소 거리를 나타내며 최대 탐지 거리는 신호가 회로의 노이즈보다 작아지기 시작하는 거리를 나타내었다. 실제 측정 가

능 범위는 노이즈의 처리 방법에 따라 달라질 수 있다. 굵은 선으로 표시된 그래프는 HDR을 사용했을 때의 그래프인데 전 영역에 걸쳐서 바람직한 모양을 보여준다. HDR 결과는 노출 시간이 짧을 때의 근거리 측정성능과 노출 시간이 길 때의 원거리 측정성능이 한 그래프에 나타난다. HDR 결과는 SDR(Standard Dynamic Range)의 결과를 노출 시간으로 나눈 것이고 실수형으로 표현된 값이므로 SDR보다 낮은 값이 나왔다고 해서 분해능이나 SNR이 떨어지는 것을 뜻하지는 않는다. 이번 설계에서는 저가화, 설계의 단순함을 위해서 센서 출력에 증폭회로를 쓰지 않았다. 증폭률을 높이면 근거리에서 센서가 포화하는 문제가 있지만, HDR 기법으로 극복 가능하므로 측정거리를 더 길게 하는 것도 수월할 것이다.

III. 결론

본 논문은 최근 모바일 라이다에 대한 관심도와 규모가 커지는 추세에서 이러한 센서의 원리와 응용 방법에 대한 이론적인 교육에 대한 수요를 만족하려는 방법을 제시하기 위하여 저비용 적외선 근접센서를 이용한 방사형 거리 센서 모듈 개발을 염두에 두고 HDR 기법을 적용하여 적외선 거리 측정 센서의 성능을 개선하였다.

다양한 저가 1차원 거리 측정 센서의 성능을 검토하여 적외선 센서가 단순, 고속, 저가라는 면에서 교육용 저비용 센서 모듈 제작에 유리하고 기존에 교육 목적으로 실습 로봇 제작이 널리 이루어지는 경주용 라인트레이서와 같은 고성능 모바일 로봇에도 쉽게 적용 가능하다는 점을 확인하였다. 적외선 반사광 감지를 이용한 1차원 거리 측정 센서의 회로 구성 방법을 살펴보았고 적외선 센서에서 극복해야 하는 한계점을 확인하였다. 적외선 센서는 거리 측정 용도로 사용할 때는 측정 거리 변화에 따른 비선형적 반사광 세기 변화로 말미암아 매우 강하거나 약한 반사광을 측정해야 하므로 다이내믹 레인지 개선이 필요하다. 그리고 외부조명에 강인한 동작도 필요하다. 이는 센서의 특성함수 활용을 통해서 가능하다. 특성함수의 근사를 위하여 적외선 반사광의 세기와 포토트랜지스터의 노출 시간을 달리한 출력전압을 다수 모아서 다항함수의 계수를 회귀분석을 통하여 구하였다. 근사한 특성함수로부터 적외선 반사광량을 추정하고 여러 추정값을 신뢰도를 고려하여 융합하여 HDR 센서 결과값을 얻는 방법을 소개하고 기존의 SDR 센서의 다이내믹 레인지와 비교하였다. 센서의 제어에는 ST사의 ARM 프로세서인 STM32F4를 사용하였는데 아날로그 신호의 연속 샘플링이 가능하다. 또한 모터제어용 주변장치도 갖추고 있으며 기존에 널리 사용되는 아두이노와 같은 교육용 키트로 보급되기도 하므로 활용도가 높다고 할 수 있다. 이를 검토할 때 로봇공학의 실습교육에서 고가의 라이다를 대체할 수 있는 대체 센서의 개발에 활용될 수 있음을 확인하였다.

References

[1] J. S. Jung and J. D. Min, “Precision positioning technology for automobile,” *Information and Communications Magazine,* vol.32, no.8, pp.38-44, 2015.

[2] S. H. Gong, S. Y. Jeon, H. Y. Ko, “Current Status and Research Trend of Sensor Fusion Positioning Technology,” *Information and Communications Magazine,* vol.32, no.8, pp.45-53, 2015.

[3] J. H. Park, S. Jung, “Development of Engineering Education Program using LEGO MINDSTORM,” *Proceedings of ICROS-Technical Committee on Robotics and Applications Joint Conference,* vol.32, no.8, pp.52-54, 2009.

[4] J. H. Ju, “A study on the Posture control of a two-wheeled mobile robot,” *Journal of Korea institute of information, electronics, and communication technology,* vol.10, no.6, pp.52-54, 2017.

[5] Tran, Van N., Robert Stuart, “Phototransistor Switching Time Analysis,” *California Eastern Laboratories,* 2009.

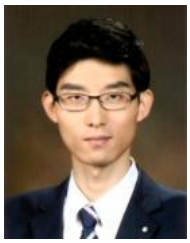
[6] D. G. Park, K. H. Park, Y. H. Ha, “Acquisition of HDR image using estimation of scenic dynamic range in images with various exposures,” *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea,* vol.45, no.2, pp.10-20, 2008.

[7] P. E. Debevec and J. Malik, “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,” *Proc. of ACM SIGGRAPH,* pp.369-378, 1997.

[8] M. A. Robertson, S. Borman and R. L. Stevenson, “Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures,” *Journal of Electronic Imaging,* vol.12, no.2, pp. 219-228, 2003.
[9] T. Mitsunaga and S. K. Nayar, “Radiometric Self Calibration,” *Journal of Electronic Imaging,* pp.374-380, 1999

BIOGRAPHY

Se-Hyoung Cho (Member)



2004 : BS degree in University of Seoul.
2007 : MS degree in Electric and Electronic Engineering, KAIST.
2016 : PhD degree in Robotics program, KAIST.
2017~ : Assistant Professor, Division of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sunmoon University.