

이동로봇을 위한 구조광 영상기반 거리측정

Distance Measurement Based on Structured Light Image for Mobile Robots

이수영*, 홍영진, 서진호
(Soo-Yeong Yi, Youngjin Hong, and Jin-Ho Suh)

Abstract: In this paper, we address an active ranging system based on laser structured light image for mobile robot application. Since the burdensome correspondence problem is avoidable, the structured light image processing has efficient computation in comparison with the conventional stereo image processing. By using a cylindrical lens in the laser generation, it is possible to convert a point laser into a stripe laser without motorized scan in the proposed system. In order to achieve robustness against environmental illumination noise, we propose an efficient integro-differential image processing algorithm. The proposed system has embedded image processing module and transmits distance data to reduce the computational burden in main control system.

Keywords: laser structured light image, active ranging system, laser stripe, integro-differential image, calibration

I. 서론

이동로봇의 위치추정 및 자율주행을 위해서는 로봇 주변 물체의 거리를 측정할 수 있는 센서가 필수적이다. 일반적으로 물체 거리측정 방법에는 다음과 같은 4가지 방식이 있다 [1]: (1) 스테레오 영상 방식, (2) 블러영상 방식, (3) 신호 채공 시간 측정방식, (4) 구조광 영상방식.

스테레오 영상방식은 많은 정보량을 포함한다는 장점이 있으나, 센서시스템 구축에 고비용이 소요되고, 전통적인 대응점(correspondence) 문제를 풀기 위해 많은 계산량이 필요하므로 거리측정 주파수가 낮으며, 조명잡음에 민감하다는 문제점이 있다[2]. 블러 영상방식은 단일 카메라를 사용하므로 상대적으로 경제적이라는 장점이 있지만 계산량이 많으므로 거리측정속도가 느리며, 또한 측정 정밀도도 낮다는 문제점이 있다[8]. 신호의 채공시간을 측정함으로써 거리를 계산하는 방식은 매개신호와 신호처리 전자회로에 따라 그 특성이 매우 달라진다. 예로서 근래에 많이 사용되는 초음파 센서는 대표적인 채공시간을 측정방식으로서, 처리회로가 간단하고 경제적이라는 장점이 있으나, 측정 정밀도가 낮고 또한 측정 주파수도 매우 낮다는 문제점이 있다[6,7]. 또 다른 예로서 잘 알려진 레이저스캐너는 매우 높은 계측 정밀도를 가지며, 측정속도가 빠르다는 장점이 있으나[9] 고정밀도의 처리회로와 여러 방향의 거리 측정을 위한 스캔 구동에 매우 정밀한 기계장치를 필요로 하기 때문에 가격이 비싸고, 또한 내구성이 약하다는 문제점이 있다.

한편 구조광 영상방식은 레이저와 같이 주변조명과 구별이 되는 특정주파수의 빛을 구조적으로 조사하고, 구조광의 주변 물체와의 거리에 따른 구조광의 왜곡을 영상으로 측정

하여 거리를 계산하는 것으로 컴퓨터 비전 분야에서 오랫동안 연구되어 온 방식이다[2-5,10]. 과거에는 레이저 발생장치가 크고 비싸며, 또한 영상장치의 처리속도가 느려서 실용화하기 힘들다는 문제점이 있었다. 그러나 근래에는 레이저 반도체의 등장으로 레이저 발생이 쉬워졌고, 영상카메라가 매우 저렴해졌으며, 또한 처리속도가 빠른 프로세서가 등장하여 작고 경제적인 구조광 영상기반 거리측정 센서 개발이 가능해 졌다.

본 논문에서는 레이저 구조광 영상 기반의 소형 거리측정 센서에 대해 기술한다. 구조광의 형태로 기존에는 점형(point) 레이저를 사용하거나, 혹은 이를 반사경 스캔을 통해 선형(stripe)으로 분산시키는 방식이 사용되었으나 본 논문에서는 실린더 렌즈를 통해 기계적인 스캔없이 띠 형태로 분산시킨 선형레이저를 사용한다. 실린더 렌즈를 통한 분산 방식은 기계적인 스캔을 필요로 하지 않으므로 별도의 기계장치가 필요 없고, 또한 한번에 넓은 영역을 조사함으로써 처리속도가 매우 빨라질 수 있다는 장점이 있다. 그러나 분산된 선형 레이저는 광 에너지 밀도가 낮으므로 주변 조명잡음이 강할 때, 영상처리를 통해 감지하는 것이 어려워 질 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 본 논문에서는 구조광 조명 모듈레이션에 따라 얻은 배경영상과 구조광 영상을 반복적으로 차적 분함으로써 영상면에서 구조광 데이터를 쉽게 추출할 수 있는 영상처리 방법을 제안한다. 또한 임베디드 프로세서를 갖는 소형 카메라를 이용하여 주 컴퓨터에 연산부담을 주지 않고 거리데이터만을 빠르게 주 컴퓨터로 전달하는 스마트형 거리측정 센서 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 카메라 렌즈의 시야각(FOV, Field-Of-View)에 해당하는 넓은 폭의 거리 데이터를 한번의 영상획득을 통해 측정할 수 있으므로 단방향의 거리만을 측정하는 초음파 센서, 혹은 PSD 센서에 비해 매우 효율적으로 물체 거리 맵을 얻을 수 있으며, 따라서 이동 로봇의 지도작성, 자동주행에 효과적으로 적용될 수 있다.

II. 구조광 영상기반 시스템

1. 구조광 영상기반 시스템

다음 그림 1은 레이저 구조광 영상 기반 거리측정 시스템

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 14., 수정: 2009. 11. 3., 채택확정: 2009. 11. 27.

이수영: 서울산업대학교 전기공학과 (suylee@snut.ac.kr)

홍영진, 서진호: 포항지능로봇연구소 연구개발부

(bhong@postech.ac.kr/suhgang@postech.ac.kr)

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0073417)에 의하여 연구되었음.

※ 상기 논문은 KACC2009 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

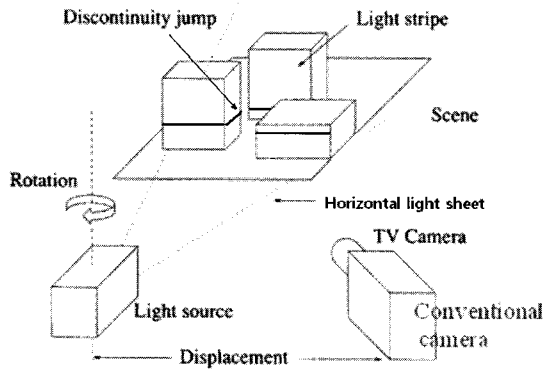


그림 1. 구조광 영상 기반 거리측정 시스템[2].
Fig. 1. Distance measurement system based on structured light image.

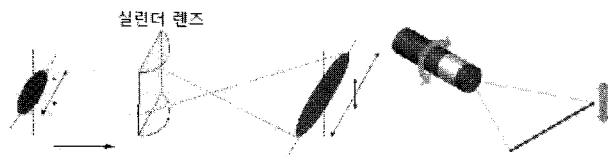


그림 2. 실린더 렌즈를 통한 구조광 선형변환.
Fig. 2. Laser stripe generation by using cylinder lens.

의 개념도이다.

구조광 영상기반 시스템은 일반적인 카메라와 구조광 조사 장치로 구성된다. 카메라와 구조광은 시각편차(disparity)를 가져야 한다. 주변조명과 구별되는 구조광 발생장치로는 적색(660nm)의 가시광선 레이저, 혹은 적외선(760nm) 레이저가 사용되며, 점 형태의 레이저 원을 선형으로 만들기 위해 거울스캔장치, 혹은 실린더 형태의 렌즈를 사용할 수 있다(그림 2). 실린더 렌즈를 사용하여 구조광을 선형으로 변환하는 경우에는 광에너지 밀도가 낮아지므로 영상처리과정에서 주변 조명잡음에 약해질 수 있다. 따라서 구조광 검출가능성을 높이기 위한 영상처리 방법이 필요하다.

레이저 구조광 영상은 물체와의 거리에 따른 왜곡을 갖게 되므로, 이 왜곡의 크기를 측정함으로써 물체거리를 계산할 수 있다. 이동로봇과 같이 수직방향의 거리정보 보다 수평방향의 거리정보가 중요한 경우에 그림 1에서 보인 바와 같이 일정한 높이의 구조광을 수평방향으로 조사하고 이동로봇 주행에 필요한 물체거리 정보를 획득할 수 있다.

구조광 영상기반 시스템은 스테레오 영상기반 시스템의 가장 큰 문제점인 대응점(correspondence) 문제를 피할 수 있으므로 계산부담이 적고, 스테레오 영상 방식에 비해 상대적으로 주변조명 잡음에 강하다는 장점이 있다. 그러나 진술한 바와 같이 레이저 선형변환에 의해 광 에너지 밀도가 낮아지는 경우에 주변조명 잡음에 보다 강한 효율적인 영상처리 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 효율적인 구조광 영상 처리를 위해 다음과 같은 영상 차적분 알고리즘을 제안한다.

2. 구조광 영상 차적분

구조광 영상에서 배경영상을 없애고 구조광 영상만을 추출하기 위한 한가지 쉬운 방법은 정해진 파장영역의 광신호만 투과시키는 광학필터를 사용하는 것이다. 그러나 날카로운 투과특성을 갖는 광학필터는 가격이 비싸다는 문제점이 있다.

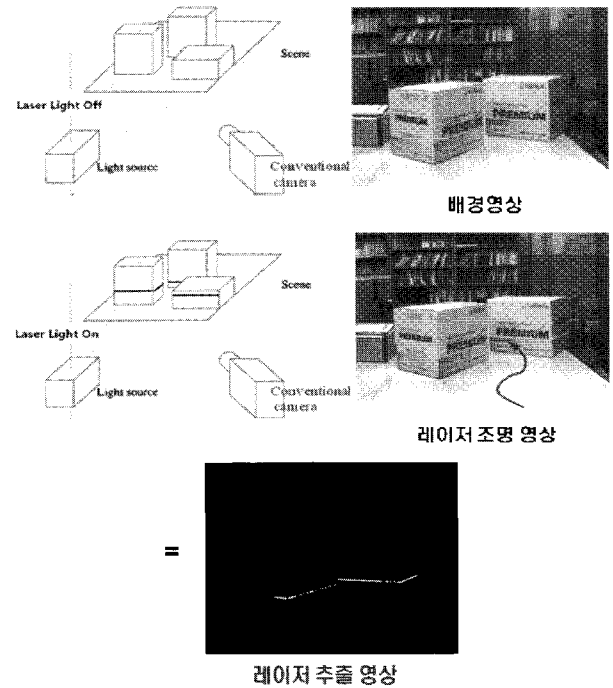


그림 3. 구조광 영상 추출을 위한 차영상법.
Fig. 3. Image difference for extraction of structured light.

구조광 영상을 추출하기 위한 또 다른 방법은 그림 3과 같이 구조광을 조사하지 않고 획득한 배경영상과 구조광을 조사하고 얻은 영상간의 차(difference) 영상을 구하는 것이다. 차 영상법은 단순히 두 영상간에 대응되는 픽셀의 강도 차이를 구하는 것으로 영상감시 시스템과 같이 정지영상에 나타나는 동적 물체 정보를 추출하기 위해 사용되는 방법이다. 차영상을 얻기 위해서는 구조광 조명과 영상획득간의 동기화를 위한 레이저 모듈레이션 과정이 필요하다. 차 영상법은 광학필터와 같은 별도의 하드웨어를 필요로 하지 않고, 소프트웨어적으로 구조광만을 추출할 수 있는 경제적인 방법이다.

진술한 바와 같이 선형으로 변환된 구조광을 사용하는 경우에는 광에너지 밀도가 낮아질 수 있다. 따라서 주변 조명에 강인하도록 하기 위해서는 구조광 부분이 주변에 비해 두드러지도록 하는 영상처리 방법이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 차영상열을 시간에 따라 적분하는 적분 영상법을 제안하였다. 차분 영상열의 적분, 즉 영상 차적분 방법은 구조광 영상 픽셀들을 선택적으로 강화하고, 상대적으로 이외의 픽셀들은 약화시킨다는 의미가 있다. 적분횟수는 주변 조명잡음의 강도에 따라 조절하여야 한다. 차적분 영상법의 효과는 5절에서 실험을 통해 제시한다.

III. 거리계산 및 측정오차 분석

구조광 추출 영상으로부터 거리계산을 하기 위해서는 차적분 영상에서 구조광 픽셀위치를 얻어야 한다. 이를 위한 가장 쉬운 방법은 구조광 추출영상의 각 픽셀열(column)에서 가장 강도가 높은 픽셀의 위치를 찾고, 이 과정을 모든 픽셀열에 대해서 반복하는 것이다.

다음 그림 4에서 구조광 영상기반 거리측정 방법을 설명한다. 카메라 센서와 구조광 발생장치는 수직방향으로 편차

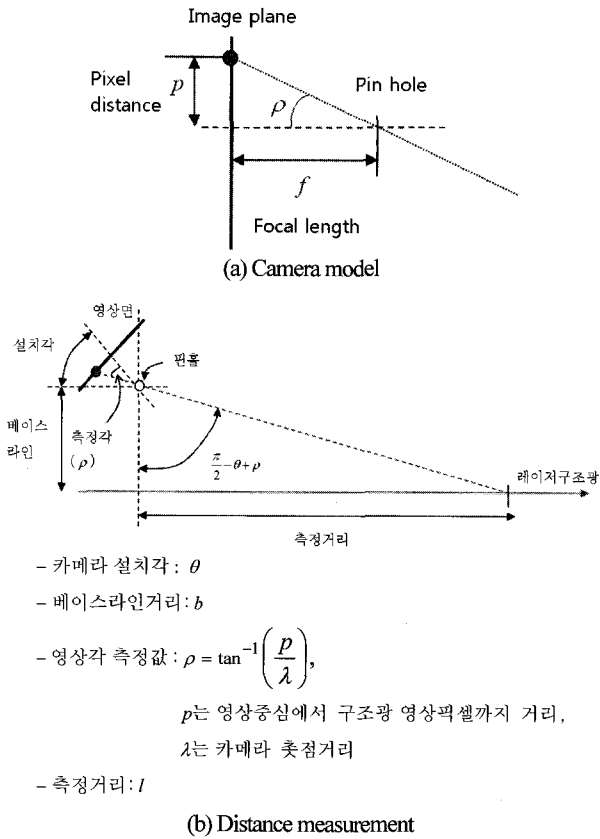


그림 4. 카메라 모델 및 구조광 영상기반 거리측정.

Fig. 4. Camera model and distance measurement based on structured light image.

를 가지도록 설치되었으며, 구조광은 수평방향으로 조사된다고 가정한다. 그림 4는 수직방향의 단면도이다.

위 그림에서 물체까지의 측정거리, l 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{l}{b} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \rho\right)$$

$$\Rightarrow l = b \cdot \tan\left\{\frac{\pi}{2} - \theta + \tan^{-1}\left(\frac{p}{\lambda}\right)\right\} = b \cdot \cot\left\{\theta - \tan^{-1}\left(\frac{p}{\lambda}\right)\right\} \quad (1)$$

위 식에서 측정거리는 카메라와 구조광 발생장치 사이의 편차, 즉 베이스라인 b 에 의존함을 알 수 있다.

카메라 영상센서는 2차원 형태의 일정한 간격을 갖는 이산화된 픽셀센서들의 배열이다. 따라서 측정과정에서 픽셀 오차에 따라 실제거리 측정값에 오차가 발생할 수 있다. 픽셀 오차에 따른 거리측정값 오차의 크기 비, 즉 픽셀오차 민감도(sensitivity)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial l}{\partial p} = \frac{b}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sin^2\left\{\theta - \tan^{-1}\left(\frac{p}{\lambda}\right)\right\}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{p}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

픽셀오차 민감도의 의미는 다음과 같다. 그림 5는 측정 픽셀 위치에 따른 측정거리 (1)과 민감도 (2)를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 식 (1)과 (2)에 필요한 매개변수들은 5절의 실험을 통해 구한 결과(표 1)를 이용하였다. 픽셀 0은 영상면

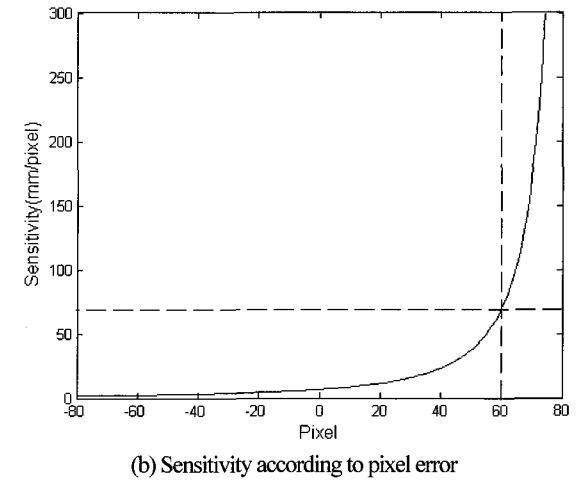
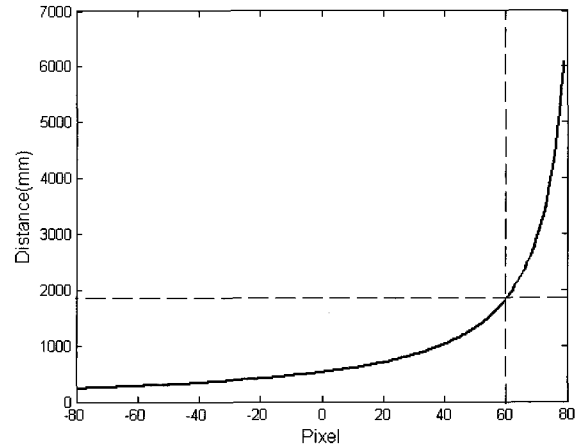


그림 5. 측정거리 및 픽셀오차 민감도.

Fig. 5. Measured distance and sensitivity.

에서 상하 방향의 중심을 나타낸다. 그림 5 (b)에서 측정 픽셀위치가 60일 때, 픽셀오차 민감도가 대략 65mm 정도임을 볼 수 있다. 이는 그 위치에서 한 픽셀 측정오차는 65mm 정도의 거리오차에 해당함을 의미한다. 측정 픽셀위치가 60보다 큰 영역에서는 픽셀오차 민감도가 매우 크므로 측정된 거리값의 신뢰성이 떨어지게 된다. 그림 5 (a)에서 측정 픽셀위치가 60보다 작은 영역은 측정거리 2m에 해당하므로 이 시스템은 측정거리 영역 2m에서 측정 픽셀오차 65mm 이하의 신뢰성을 갖는다고 할 수 있다. 물론 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 측정거리와 민감도는 베이스라인 거리 b 에 의존하므로, 이를 2배로 증가시키면 거리측정 가능영역은 $\sim 4m$ 로 늘어날 수 있다. 이 경우 픽셀오차에 따른 거리오차도 커지게 된다.

또 한가지 주목해야 할 점은 카메라 설치각에 따라 측정가능 거리영역과 영상센서의 활용도가 달라질 수 있다는 것이다. 그림 6은 카메라 설치각이 0° 인 경우에 해당하는데, 측정가능 영역은 길어지지만 영상센서의 상반면만 사용하게 됨을 알 수 있다. 즉 구조광 영상이 영상센서의 상반면에만 상이 맺히게 되므로 센서의 활용도는 50% 이하가 된다. 센서 활용도가 낮아진다는 것은 거리측정 정밀도가 낮아지고, 픽셀오차에 따른 민감도가 높아짐을 의미한다.

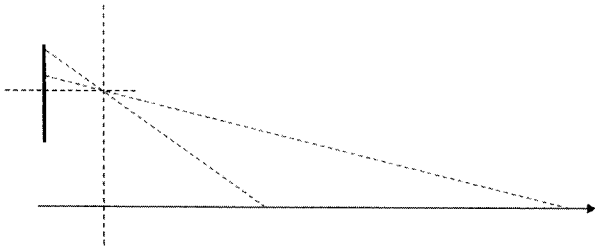


그림 6. 카메라 설치각 $\theta = 0^\circ$ 일 경우 영상센서활용도.

Fig. 6. Camera sensor utilization in case of camera angle $\theta = 0^\circ$.

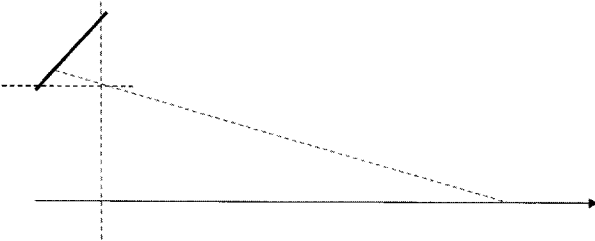


그림 7. 카메라 설치각 $\theta = 45^\circ$ 일 경우 영상센서 활용도.

Fig. 7. Camera sensor utilization in case of camera angle $\theta = 45^\circ$.

그림 7은 카메라 설치각이 $\theta = 45^\circ$ 인 경우에 해당하는데, 이 경우는 측정가능 거리영역은 짧아지지만, 영상센서의 전 영역을 사용하게 된다. 물론 여기서 카메라의 화각(FOV)이 $-45^\circ \sim +45^\circ$ 라고 가정하였으나 렌즈에 따라 이보다 넓을 수도, 혹은 좁을 수도 있다. 즉, 카메라 렌즈의 화각에 따라 센서 활용도 100%를 위한 카메라 설치각이 달라질 수 있다.

정리하면, 카메라 설치각을 $\theta = 0^\circ$ 하는 경우는 측정가능 거리가 길어지지만 센서 활용도가 낮고, 측정 정밀도가 낮아지며, 카메라를 기울여서 설치하는 경우는 측정가능 거리가 짧아지지만 센서 활용도가 높고 측정정밀도가 높아지게 된다. 100%의 센서 활용도를 위한 카메라 설치각은 렌즈의 화각에 따라 결정된다.

IV. 측정거리 캘리브레이션

측정 픽셀데이터로부터 식 (1)을 이용하여 거리값을 계산하기 위해서는 매개변수, 즉 베이스라인 거리 b , 카메라 설치각 θ , 그리고 카메라의 초점거리 λ 값이 필요하다. 이들 매개변수 값은 미리 알고 있는 실제 거리데이터 값으로부터 최소제곱오차법에 의한 캘리브레이션 과정을 통하여 추정할 수 있다. 먼저 데이터 캘리브레이션을 위한 최소제곱오차를 다음 식 (3)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{n=1}^N e_n^2 \\
 &= \sum_{n=1}^N \left\{ \hat{l}_n(p_n) - l_n \right\}^2 \\
 &= \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{\lambda} \right) + d - l_n \right\}^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 \hat{l}_n 은 측정 픽셀거리 p_n 을 이용하여 계산한 거리 값이며, l_n 은 실제 거리 값이다. 또한 거리측정 모델 식은 거리

측정의 기준점이 불확실한 상황을 반영하기 위하여 거리 오프셋 d 를 포함한 다음 식 (4)로 하였다.

$$l = b \cdot \cot \left\{ \theta - \tan^{-1} \left(\frac{p}{\lambda} \right) \right\} + d \tag{4}$$

추정하고자 하는 매개변수는 최소제곱오차 (3)을 최소화하는 값이므로 다음과 같은 gradient 탐색과정에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{k+1} &= E_k - \Delta \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial b} + \frac{\partial E}{\partial d} + \frac{\partial E}{\partial \theta} + \frac{\partial E}{\partial f} \right) \\
 a_{k+1} &= a_k - \Delta \cdot \frac{\partial E}{\partial a}, \quad k = 1, 2, \dots
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 a 는 각 매개변수, b , θ , f 및 d 를 나타내며, k 는 반복과정을 의미한다. 또한 Δ 는 매개변수 갱신 간격을 나타낸다. 각 매개변수에 대한 최소제곱오차의 gradient는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E}{\partial b} &= 2 \cdot \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right) + d - l_n \right\} \cdot \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right) \\
 \frac{\partial E}{\partial d} &= 2 \cdot \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right) + d - l_n \right\} \\
 \frac{\partial E}{\partial \theta} &= -2 \cdot \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right) + d - l_n \right\} \cdot \frac{b}{\sin^2 \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right)} \\
 \frac{\partial E}{\partial f} &= -2 \cdot \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right) + d - l_n \right\} \cdot \frac{b}{\sin^2 \left(\theta - \tan^{-1} \frac{p_n}{f} \right)} \cdot \frac{p_n}{p_n^2 + f^2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

탐색과정은 오차가 일정한 값에 수렴하게 되면 중지한다.

V. 실험 결과

그림 8은 본 연구를 통해 개발한 구조광영상기반 거리측정 센서 시스템이다. 상위 주 제어기에 영상처리 계산부담을 주지 않고 거리데이터만을 빠르게 전달하기 위해 임베디드 영상처리 모듈을 채택하였다. 영상처리 모듈로는 Carnegie Mellon 대학에서 영상처리용 개방형 플랫폼으로 개발한 CMUcam3를 사용하였다. CMUcam3는 다음과 같은 특징을 갖는다:

- Omnivision사의 CMOS OV6620 영상센서, 352x288 해상도, 컬러 8비트/픽셀
 - ARM7TDMI CPU, 64KB RAM 및 128KB Flash
 - MMC/SD flash 보조메모리
 - 115,200 bps 직렬통신채널
 - QCIF의 경우 최대 26fps(frame per second) 영상획득 속도
- 구조광 발생장치로는 660nm 파장의 5mw급 적색 반도체 레이저와 이를 120° 폭으로 선형 변환하기 위한 실린더 렌즈, 그리고 영상획득과정에 맞춰 구조광 발생을 반복적으로 온-오프하기 위한 모듈레이션 회로 일체형 제품을 사용하였다. 구조광 발생과 영상획득 과정의 동기화 및 영상 차적분

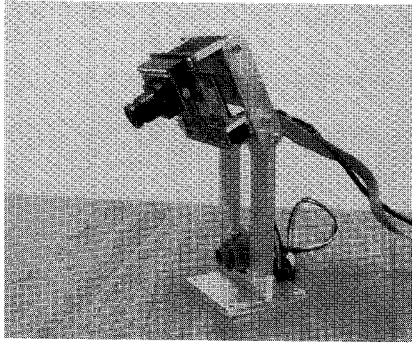


그림 8. 구조광 영상기반 스마트 거리측정 센서.
Fig. 8. Smart distance measurement sensor module based on structured light image.

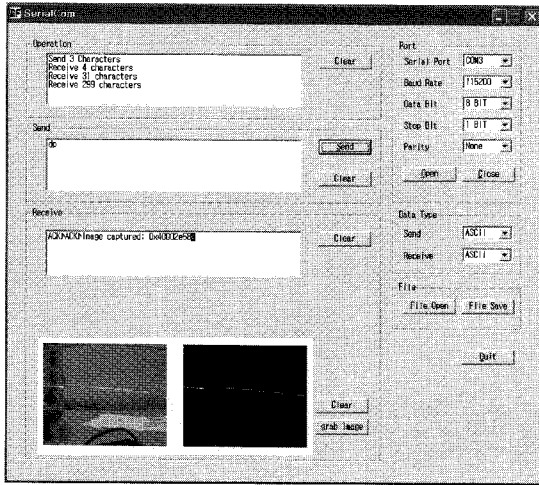


그림 9. PC쪽 시리얼 인터페이스 화면.
Fig. 9. Serial interface program on PC.

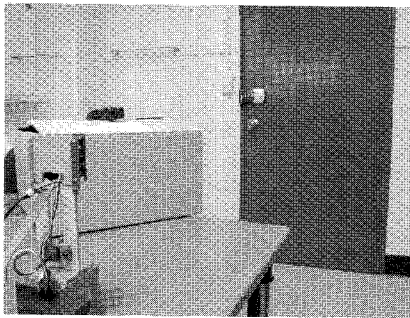


그림 10. 구조광 영상 획득 실험.
Fig. 10. Experiment for structured image acquisition.

알고리즘은 임베디드 영상처리 프로그램에서 소프트웨어적으로 처리하고, 차적분 영상으로부터 구조광 픽셀을 검출한 결과만 상위 PC쪽으로 직렬통신 채널을 통해 전송한다.

그림 9는 임베디드 영상 모듈에서 전송된 구조광 픽셀 데이터를 PC에서 확인하기 위한 사용자 인터페이스 화면이다. 알고리즘 디버깅을 위해 추출된 구조광 데이터뿐만 아니라, 원영상도 받아서 표시할 수 있도록 하였다. 물론 임베디드 영상 모듈과 PC간의 데이터 전송은 상대적으로 속도가 느린 직렬통신을 통하므로 원영상을 실시간으로 받아 볼 수는 없다. 그러나 추출된 구조광 데이터는 데이터 양이 적으므로

직렬통신으로 실시간 전송이 가능하다.

본 센서 모듈을 통해 구조광 영상기반으로 거리데이터를 계속하기 위한 실험을 행하였다. 그림 10은 실험상황을 보여 준다. 그림에서 중간 부분의 적색 라인이 레이저 구조광이다.

아래 그림 11은 영상 차적분 횟수에 따른 주변조명 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위한 실험결과다. 그림의 왼쪽은 원영상이며, 오른쪽은 차적분 영상이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 차적분 횟수가 늘어날수록 레이저 구조광 부분이 주변에 비해 두드러지게 된다. 이는 주변 조명 잡음에 대해 구조광 영상처리가 강인해짐을 의미한다.

본 카메라 영상센서의 영상획득 속도는 QCIF의 경우 26fps에 이른다. 그림 11에 보인 바와 같이 3회 차적분 영상을 얻기 위해서는 모두 6장의 영상이 필요하므로 영상획득에 필요한 시간이 0.23초이며, 구조광 검출 영상처리 과정과 데이터 전송속도를 포함하면 대략 0.4초 이내에 한 화면의 구조광 픽셀 데이터를 얻을 수 있다. 따라서 거리 데이터 획득 속도가 2.5Hz 정도에 이르게 된다.

본 센서 모듈의 거리측정 성능을 확인하기 위하여 물체를 카메라 영상면에 수평하게 놓고, 0.5m ~ 2.5m 영역에서 4cm 간격으로 이동하면서 카메라 차적분 영상으로부터 구조광 픽셀 위치 데이터 50세트를 측정하였다. 그림 12는 측정된 픽셀 위치에 대한 실제거리 데이터를 보여준다. 카메라 센서의 영상 해상도는 352x288이지만, 측정속도를 높이기 위해 QCIF 해상도로 영상을 획득하였다. 따라서 상하방향의 해상도는 144픽셀이며, 중심을 기준으로하면 구조광 픽셀 위치

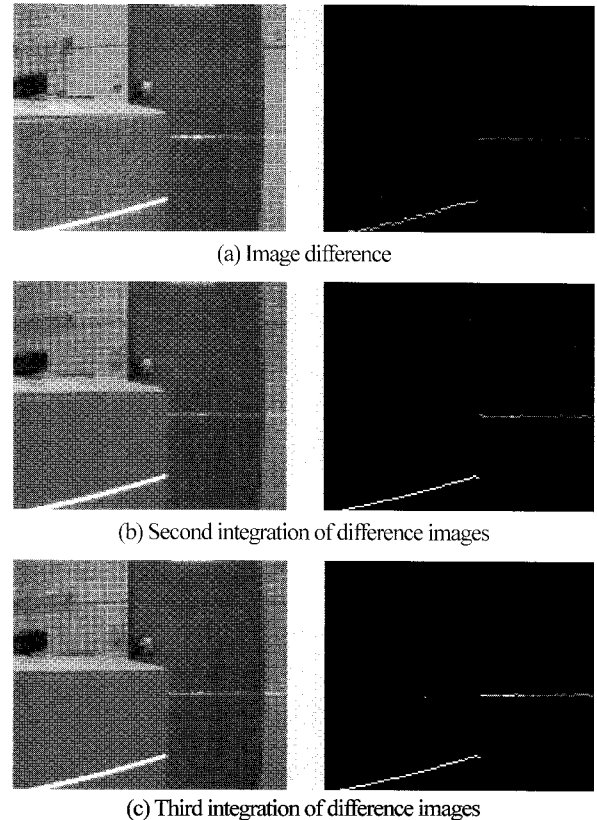


그림 11. 구조광 차적분 영상처리 결과.
Fig. 11. Result of integro-differential structured light image processing.

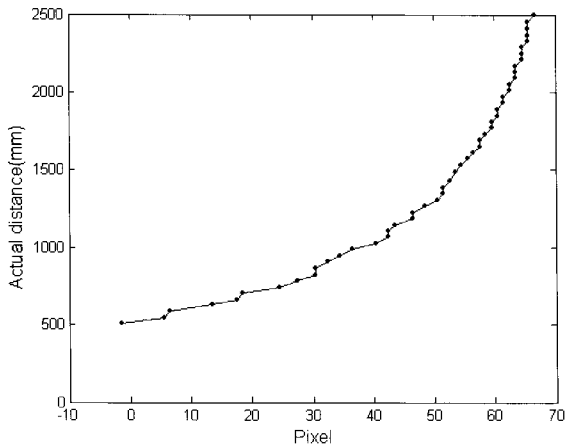


그림 12. 측정 데이터.
Fig. 12. Measurement data.

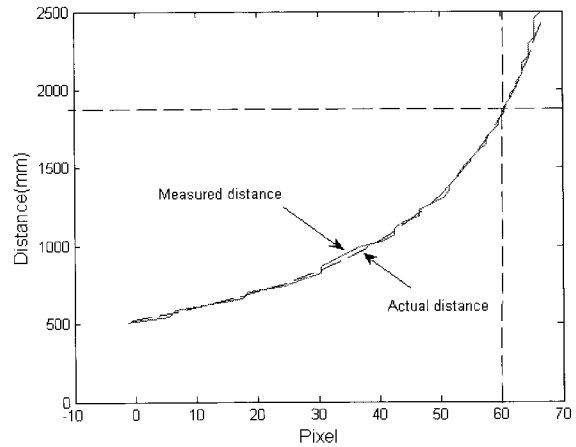


그림 14. 거리측정 실험결과.
Fig. 14. Result of distance measurement.

표 1. 수렴 상태에서 매개변수 값.

Table 1. Parameter values at convergent state.

매개변수	b (mm)	θ (deg)	f (mm)	d (mm)
수렴값	234.8	25.8	180.9	41.5

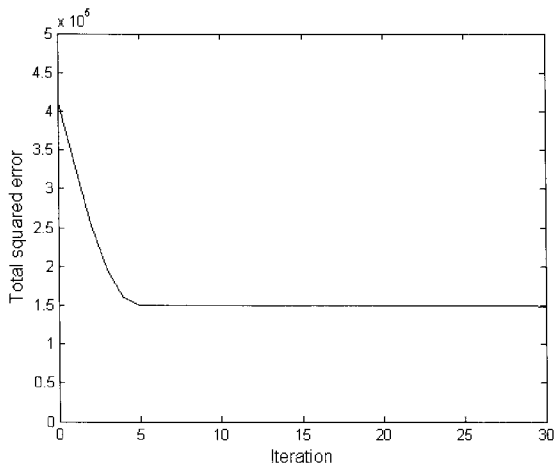


그림 13. Gradient 방법에 의한 거리 캘리브레이션 과정.
Fig. 13. Distance calibration process by gradient method.

값은 [-72,+72]의 영역에 있게 된다.

그림 13은 측정 데이터로부터 거리 계산식 (4)의 매개변수들을 추정하기 위한 gradient 캘리브레이션 과정을 보여준다. 매개변수들의 수렴 값들을 다음 표에 정리하였다.

그림 14는 캘리브레이션을 통해 얻은 매개변수 값들을 이용하여 계산한 측정 거리값과 실제 거리값을 비교한 것이며, 그림 15는 이들 간의 오차를 표시한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 픽셀 위치 60이하의 영역에서 ~2m의 측정 거리를 가지며, 측정오차는 4cm이하이다.

그림 5에서 설명한 바와 같이 본 센서 모듈을 통해 측정할 수 있는 거리 영역은 [-70, 70] 픽셀에 대해서 ~3m에 이른다. 그러나 픽셀 위치값이 60이상인 영역에 대해서는 픽셀오차에 따른 거리오차 민감도가 크므로 측정 데이터의 신뢰성이 약하다. 따라서 신뢰성 있는 거리측정 영역을 ~2m로 제한할 필요가 있다.

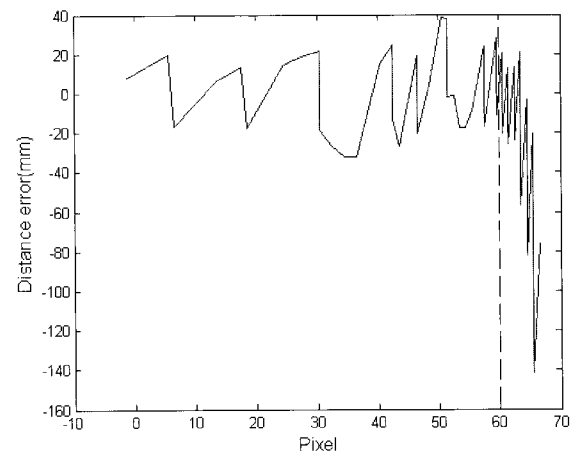


그림 15. 거리측정 오차.
Fig. 15. Distance measurement error.

VI. 결론

구조광 영상처리 방식은 물체거리에 따른 레이저 구조광의 영상왜곡을 측정함으로써 거리를 측정하는 것이다. 이 방식은 고전적인 대응점 문제가 없으므로 계산 부담이 적고, 한 장의 영상으로 렌즈의 시야각에 해당하는 넓은 폭의 거리 정보를 얻을 수 있으므로 매우 효율적이며, 주변 조명과 구별되는 구조광을 사용하므로 조명잡음에 강인하다는 특성이 있다. 특히 근래에는 반도체 레이저 발생장치와 저렴한 영상 센서의 등장으로 매우 경제적인 구현이 가능해졌다.

본 논문에서는 이동로봇을 위한 구조광 영상처리 기반의 스마트 거리측정 센서 모듈을 개발하였다. 이동로봇의 주제 어기에 영상처리 연산의 부담을 주지 않고 측정 거리 데이터만을 전달하기 위해 임베디드 영상처리 모듈을 채택하였으며, 모터-제어기와 같은 기계적인 스캔을 피하기 위해 실린더 렌즈로 점형 레이저를 선형으로 변환하는 방식을 이용하였다. 선형으로 변환하는 과정에서 구조광 에너지 밀도가 낮아지므로, 주변조명 잡음에 대한 강인성을 확보하고 구조광 추출을 용이하게 하기 위한 차적분 영상처리 알고리즘을 제안하고, 실험을 통해 확인하였다.

구조광 영상기반 거리측정 센서 모듈은 카메라 렌즈의 시

야각(FOV: Field-Of-View)에 해당하는 넓은 폭의 거리 데이터를 한번에 측정할 수 있으므로 단방향의 거리만을 측정하는 초음파 센서, 혹은 PSD 센서에 비해 매우 효율적으로 물체 거리만을 얻을 수 있으며, 따라서 이동로봇의 지도작성, 자동주행에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

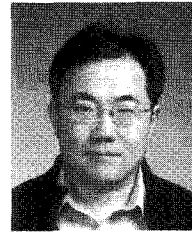
본 논문에서 개발한 센서모듈은 다음의 두가지 면에서 개선이 필요하다. 먼저, 제안한 영상 차적분 알고리즘은 정적(static)인 환경에서는 문제가 되지 않으나, 이동로봇에 장착하는 경우와 같이 동적(dynamic)인 상황에서는 구조광을 조사한 영상과 구조광을 조사하지 않은 영상 시간차이에 의해 배경영상에 픽셀차이가 있으므로 많은 잡음이 포함될 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제를 극복하기 위해서는 두 영상간의 시간차가 적은 고속 카메라 및 고속 영상처리 하드웨어가 필요하며, 단순한 차적분 및 구조광 검출 방식보다는 좀더 복잡한 영상처리 알고리즘이 필요할 것이다. 두번째는 카메라 자체의 캘리브레이션 문제이다. 본 논문에서는 이상적인 핀홀 카메라 모델을 가정하였으나, 카메라 렌즈에 의한 영상 왜곡으로 인해 거리측정값에 오차가 발생할 수 있다. 영상왜곡에 의한 측정오차는 크지 않으므로 무시하였으나, 보다 정교한 거리측정을 위해서는 렌즈에 의한 왜곡을 보상하는 과정이 필요하다.

참고문헌

- [1] Y. Oike, "Smart image sensors and associative engines for three dimensional image capture," Ph.D. Thesis, Univ. of Tokyo, 2004.
- [2] R. Jain et. al, *Machine vision*, McGraw-Hill, 1995.
- [3] 노동기, 김근우, 이범희, "Structured Light 기법을 이용한 이동로봇의 상대위치 추정 알고리즘 연구," 제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지, 제11권 제8호, pp. 678-687, 2005.
- [4] 류지형, 김진원, 이수영, "능동 전방향 거리측정 시스템을 이용한 이동로봇의 위치 추정," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제14권 제5호, pp. 483-488, 2008.
- [5] S. Yi et. al, "Real-time omni-directional distance measurement with active panoramic vision," *Int'l Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 184-191, 2007.
- [6] J. Leonard and H. Durrant-Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer academic publisher, 1992.
- [7] S. Cameron and P. Probert, *Advanced Guided Vehicles, Aspects of the Oxford AGV Project*, World Scientific, 1994.
- [8] J. Lewis and L. Maler, "Blurring of the senses: common cues for distance perception in diverse sensory systems," *Neuroscience*, vol. 114, no. 1, pp. 19-22, 2002.

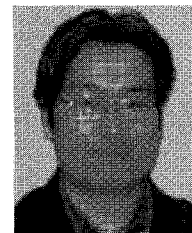
[9] <http://www.sick.com>

[10] 이수영, 김성도, 홍영진, 서진호, "레이저 구조광 영상기반 능동 거리측정 시스템," 한국자동제어학술회의(KACC 2009) 부산, 2009.



이수영

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007. 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇 센서.



홍영진

1993년 2월 고려대학교 정보공학과 졸업(공학사). 1995년 2월 고려대학교 산과학과 졸업(이학석사). 1994년 11월~1999년 9월 PSINet Korea 기술연구소 연구원. 1999년 9월~2006년 9월 삼성종합기술원 HCI Lab 전문연구원. 2006년 9월~2007년 8월 일본 동경대학교 생산기술연구소 객원연구원. 2007년 8월~현재 (재)포항지능로봇연구소 책임연구원. 관심분야는 의료로봇, 수중로봇.



서진호

1993년 2월 한양대학교 수학과 졸업(이학사). 1998년 2월 부경대학교 대학원 졸업(공학석사). 2002년 3월 일본 동경공업대학교(Tokyo Institute of Technology) 제어시스템공학과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 부경대학교 해양산업개발연구소 선임연구원. 2003년~2006년 동아대학교 전기공학과 국가직정연구실(NRL) Post-Doctor. 2006년 4월~현재 (재)포항지능로봇연구소 연구개발부 팀장. 관심분야는 의료서비스로봇, 해양로봇, 로봇 플랫폼 통합설계 및 제어.