

조명잡음에 강인한 구조광 영상기반 거리측정 센서

(Illumination Invariant Ranging Sensor Based on Structured Light Image)

신 진* · 이수영**

(Jin Shin · Soo-Yeong Yi)

Abstract

This paper presents an active ranging system based on laser structured-light image. The structured-light image processing is computationally efficient in comparison with the conventional stereo image processing, since the burdensome correspondence problem is avoidable. In order to achieve robustness against environmental illumination noise, an efficient image processing algorithm, i.e., integration of difference images with structured-light modulation is proposed. Distance equation from the measured structured light pixel distance and system parameter calibration are addressed in this paper. Experiments and analysis are carried out to verify performance of the proposed ranging system.

Key Words : Ranging System, Structured Light Image, Robustness against Environment Illumination, Integration of Difference Images

1. 서 론

거리측정 센서는 건축, 공장자동화 등 뿐만 아니라 보안, 감시분야에 광범위하게 사용되는 센서이다. 근래에는 이동로봇의 자율주행을 위해 장애물 유무, 상대거리, 자기위치를 측정하기 위한 용도로 그 활용도가 점차 증가하고 있다. 일반적으로 물체거리를 측정하기 위한 방법에는 그림 1과 같은 4가지 방식이 있다[1]: (1) 스테레오 영상방식, (2) 블러 영상방식, (3)

신호채공시간(Time-Of-Flight) 측정방식, (4) 구조광 영상방식. 스테레오 영상방식은 두 대의 카메라로 얻은 영상에서 동일 물체점을 찾고, 삼각법에 따라 거리를 계산하는 방식으로 사람 눈의 3차원 거리인지 방식과 같으며 많은 정보량을 포함한다는 장점이 있다. 그러나 두 대의 카메라를 사용하므로 고비용이 소요되고, 동일 물체점(correspondence)을 찾는데 많은 계산량이 필요하므로 거리측정 주파수가 낮으며, 또한 주변 조명잡음에 매우 민감하다는 문제점이 있다[2]. 블러 영상방식은 잘 알려진 렌즈공식에 의해 표현되는 물체거리에 따른 영상의 블러를 측정함으로써 거리를 계산하는 방식으로 단일 카메라를 사용하므로 상대적으로 경제적이라는 장점이 있지만 계산량이 많으므로 거리측정 속도가 느리며, 또한 측정 정밀도도 낮다는

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6407, Fax : 02-978-2754

E-mail : suylee@snut.ac.kr

접수일자 : 2010년 7월 12일

1차심사 : 2010년 7월 17일, 2차심사 : 2010년 8월 5일

심사완료 : 2010년 8월 17일

문제점이 있다[3]. 신호의 체공시간을 측정함으로써 거리를 계산하는 체공시간 측정방식은 매개신호와 신호처리 전자회로에 따라 그 특성이 매우 달라진다. 예로서 전통적으로 많이 사용되는 초음파 센서는 대표적인 체공시간을 측정방식으로서, 처리회로가 간단하고 경제적이라는 장점이 있으나, 측정 정밀도가 낮고 또한 측정 주파수도 매우 낮다는 문제점이 있다[4-5]. 또 다른 예로서 근래 많이 사용되는 레이저스캐너는 매우 높은 계측 정밀도를 가지며, 측정속도가 빠르다는 장점이 있으나[6] 고정밀도의 처리회로와 넓은 방향의 거리 측정을 위한 기계적인 스캔 구동에 매우 정밀한 기계장치를 필요로 하기 때문에 가격이 비싸다는 문제점이 있다.

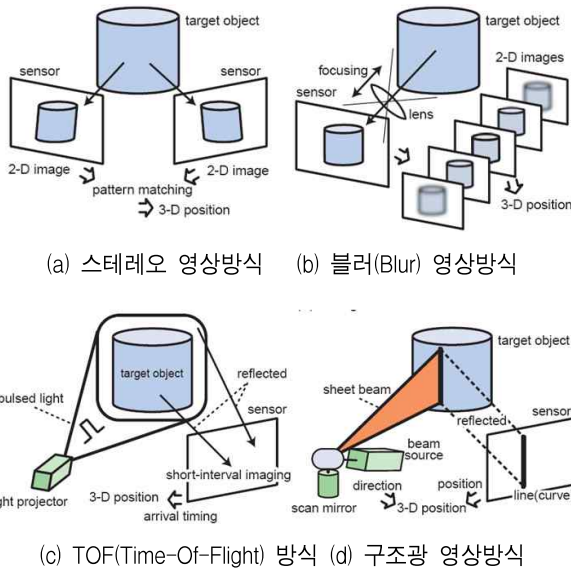


그림 1. 여러 가지 거리계측 방식[1]
Fig. 1. Several ranging methods

한편 구조광 영상방식은 레이저와 같이 주변조명과 구별이 되는 특정주파수의 빛을 구조적인 형태로 조사하고, 주변 물체와의 거리에 따른 구조광의 왜곡을 영상으로 측정하여 거리를 계산하는 것으로 컴퓨터 영상공학 분야에서 오랫동안 연구되어 온 방식이다 [2,7-9]. 과거에는 레이저 발생장치가 크고 비싸며, 또한 카메라 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 가능해졌다.

2. 구조광 영상기반 거리측정 센서

2.1 구조광 영상기반 시스템

다음 그림 2는 구조광 영상기반 거리측정 시스템의 개념도를 보여주는 것으로, 보통의 카메라와 일정한 시각편차를 갖는 구조광 조사장치로 구성된다. 주변조명과 구별되는 구조광 발생장치로는 적색(660[nm])의 가시광선 레이저, 혹은 적외선(780[nm]) 레이저가 흔히 사용되며, 점(point) 형태의 레이저 소스를 선형으로 변환하기 위해 기계적인 스캔장치나, 회절광학소자, 혹은 실린더 렌즈를 사용할 수 있다. 기계적인 스캔장치는 모터와 제어기 같은 무거운 장치가 필요하고 내구성이 떨어진다는 문제점이 있으며, 회절광학소자는 제작비용이 비싸다는 단점이 있다. 그림 3에 보이는 실린더 렌즈는 광학적으로 간단하게 빛을 분산시키는 방식이므로 경제적이며 따라서 일반적으로 많이 쓰이는 방법이다. 그러나 광에너지 밀도가 낮아지므로 영상처리과정에서 주변 조명잡음에 약해질 수 있다. 따라서 구조광 검출 성능을 높이기 위한 영상처리 방법이 필요하다.

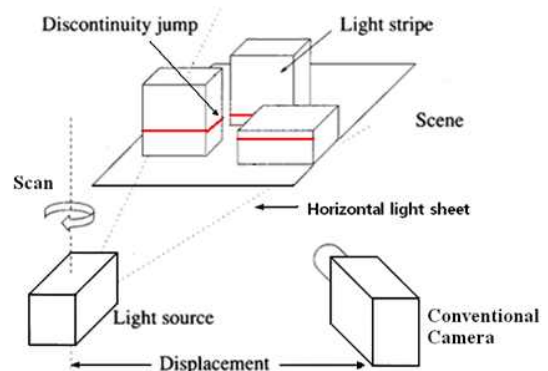


그림 2. 구조광 영상기반 거리계측
Fig. 2. Distance measurement based on structured light image

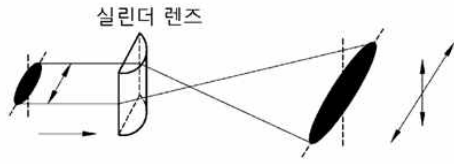


그림 3. 구조광 선형변환
Fig. 3. Stripe structured light generation

구조광은 카메라 영상면에서 물체와의 거리에 따른 왜곡을 갖게 되므로, 이 왜곡의 크기를 측정함으로써 물체거리를 계산할 수 있다. 이동로봇과 같이 수직방향의 거리정보보다 수평방향의 거리정보가 중요한 경우에 그림 2에서 보인 바와 같이 일정한 높이에서 구조광을 수평방향으로 조사하고 이를 카메라 영상으로 획득하여 물체거리 정보를 획득할 수 있다.

구조광 영상기반 거리측정 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 전술한 바와 같이 레이저 선형변환에 의해 광 에너지 밀도가 낮아지는 경우에 주변조명 잡음에 보다 강인한 효율적인 영상 처리 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 효율적인 구조광 영상 처리를 위해 다음과 같은 영상 차적분 알고리즘을 제안한다.

2.2 구조광 영상 차적분

구조광 영상기반 시스템에서 물체 거리를 얻기 위해서는 영상내에서 구조광에 해당하는 화소의 위치를 찾아야 한다.

구조광 화소를 추출하기 위한 방법은 그림 4와 같이 구조광을 조사하지 않고 획득한 배경영상과 구조광을 조사하고 얻은 영상간의 차(difference) 영상을 구하는 것이다. 차 영상법은 단순히 두 영상간에 대응되는 화소의 강도 차이를 구하는 것으로 영상감시 시스템과 같이 정지영상에 나타나는 동적 물체 정보를 추출하기 위해 많이 사용되는 방법이다. 차영상을 얻기 위해

서는 구조광 조사와 영상획득간의 동기화를 위한 레이저 모듈레이션 과정이 필요하다. 차 영상법은 광학 필터와 같은 별도의 하드웨어를 필요로 하지 않고, 소프트웨어적으로 구조광만을 추출할 수 있는 경제적인 방법이다. 구조광 모듈레이션에 따른 두 장의 영상에서 배경영상에 차이가 생기면 차영상을 구하는 과정에서 구조광 화소외에 잡음 화소들이 생길 수 있다. 이동로봇과 같이 카메라가 움직이는 경우에는 연속영상의 배경에 차이가 생길 수 있고 따라서 잡음화소의 문제가 있을 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 30 FPS(Frame Per Second)의 영상획득 속도를 갖는 일반적인 카메라 대신 영상획득 속도가 매우 빠른 카메라를 사용하였다. 영상획득 속도가 빠르면 영상 프레임간의 시간차가 크지 않으므로 배경 영상의 차이도 크지 않을 것으로 기대할 수 있다.

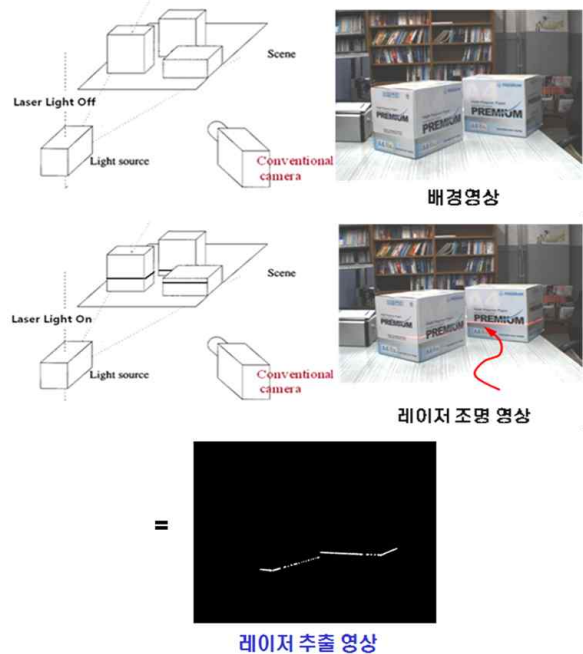


그림 4. 구조광 화소 추출을 위한 차영상법
Fig. 4. Image difference for extracting structured light pixels

전술한 바와 같이 선형으로 변환된 구조광을 사용하는 경우에는 광에너지 밀도가 낮아지므로 상대적으로 강한 주변 조명에 의해서 구조광 화소 검출이 어려워

질 수 있다. 따라서 주변 조명에 강인하도록 하기 위해서는 영상면에서 구조광 화소가 주변의 다른 화소들에 비해 두드러지도록 하는 영상처리 방법이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 순차적으로 획득한 차영상열을 시간에 따라 적분하는 영상 처리방법을 제안하였다. 다음 그림 5는 제안하는 영상 차적분 알고리즘 흐름도이다. 그림에서 M1, M2, M3, M4는 640×480 바이트 크기를 갖는 영상 메모리 블록이며, $I(0), I(2), \dots, I(18)$ 은 구조광을 켜 상태에서 얻은 영상, 그리고 $I(1), \dots, I(19)$ 는 구조광을 끈 상태에서 얻은 영상을 의미한다. 또한 $D(2,3) = I(2) - I(3)$ 등은 차영상을 의미하며, $S(0,5) = D(0,1) + D(2,3) + D(4,5)$ 등은 차분영상들을 적분한 영상을 나타낸다. 그림에서 보듯이 알고리즘의 마지막 단계에서 영상 메모리 M4에는 10회 적분된 차영상, 즉 $D(18,19) + S(0,17) = S(0,19)$ 가 저장되며, 이후에는 탐색과정을 통해 영상면에서 구조광 화소를 찾는다.

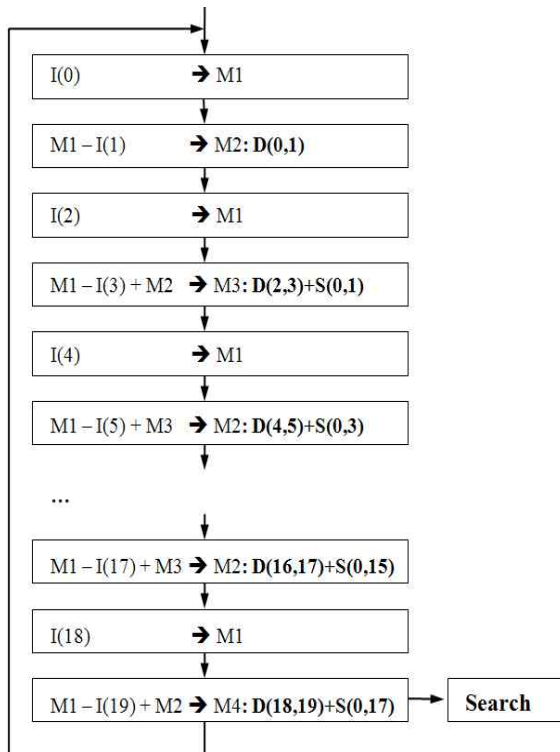
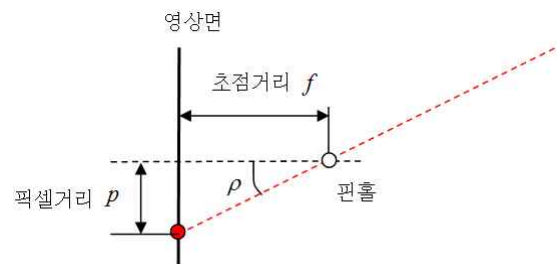


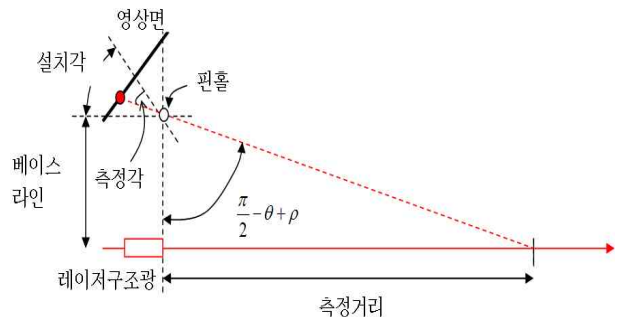
그림 5. 영상 차적분 알고리즘 흐름도
Fig. 5. Algorithm flow for integration of differential images

차분 영상열의 적분, 즉 영상 차적분 방법은 구조광 화소들을 주변의 다른 화소들에 비해 선택적으로 강화한다는 의미가 있다. 적분횟수는 주변 조명잡음과 구조광의 상대적인 강도에 따라 조절하여야 한다. 본 논문에서는 문제를 단순화하기 위해 적분횟수를 10회로 정하였다. 차적분 영상법의 효과는 5절에서 실험을 통해 제시한다.

3. 거리계산 및 측정오차 분석



(a) 카메라 모델



- 카메라 설치각: θ - 베이스라인: b
- 측정 영상각: $\rho = \tan^{-1}\left(\frac{p}{f}\right)$
- 카메라 초점거리: f - 구조광 화소 거리: p
- 측정거리: l

(b) 거리측정 모델

그림 6. 카메라 모델 및 거리측정식
Fig. 6. Camera model and distance computation model

차적분 영상에서 구조광 화소의 위치를 얻기 위해서는 각 화소열(column)에서 수직방향으로 가장 강도가 높은 화소를 찾고, 이 과정을 모든 화소열에 대해서 반복해야 한다. 이렇게 찾은 구조광 화소의 위치로

부터 다음 그림 6의 과정을 통하여 물체까지의 실제 거리를 계산할 수 있다. 그림 6은 구조광 영상기반 시스템의 수직방향 단면도를 나타낸다. 카메라 센서와 구조광 발생장치는 수직방향 편차 b 를 가지도록 설치되었으며, 구조광은 수평방향으로 조사된다고 가정한다. 또한 카메라 센서는 설치각 θ 의 크기만큼 기울어져 있다.

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

$$l = b \cdot \cot\left\{\theta - \tan^{-1}\left(\frac{p}{f}\right)\right\} \quad (1)$$

식 (1)에서 측정거리는 카메라와 구조광 발생장치 사이의 편차, 즉 베이스라인 길이 b 에 의존함을 알 수 있다.

카메라 영상센서는 2차원 형태의 일정한 간격을 갖는 이산화된 화소센서들의 배열이다. 따라서 측정 과정에서 화소 오차에 따라 실제거리 측정값에 오차가 발생할 수 있다. 화소 오차에 따른 거리측정값 오차의 크기 비, 즉 화소오차 민감도(sensitivity)는 $\frac{\partial l}{\partial p}$ 로 정의되며 식 (1)로부터 다음과 같이 구할 수 있다:

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

4. 측정거리 캘리브레이션

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

$$E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \{\hat{l}_n(p_n) - l_n\}^2 \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \left\{ b \cdot \cot\left(\theta - \tan^{-1}\frac{p_n}{f}\right) + d - l_n \right\}^2$$

여기서 \hat{l}_n 은 측정 픽셀거리 p_n 을 이용하여 계산한 거리 값이며, l_n 은 실제 거리 값이다. 또한 거리측정 모델 식은 거리측정의 기준점이 불확실한 상황을 반영하기 위하여 거리 오프셋 d 를 포함한 다음 식 (4)로 하였다.

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

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

$$E_{k+1} = E_k - \Delta \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial b} + \frac{\partial E}{\partial D} + \frac{\partial E}{\partial \theta} + \frac{\partial E}{\partial \lambda} \right)$$

$$a_{k+1} = a_k - \Delta \cdot \frac{\partial E}{\partial a}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

여기서 a 는 추정하고자 하는 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 식 (4)로부터 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot\left(\theta - \tan^{-1}\frac{p_n}{f}\right) + d - l_n \right\} \cdot \cot\left(\theta - \tan^{-1}\frac{p_n}{f}\right)$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot\left(\theta - \tan^{-1}\frac{p_n}{f}\right) + d - l_n \right\}$$

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

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

탐색과정은 오차가 일정한 값에 수렴하게 되면 중지한다.

5. 실험 결과

5.1 실험 장치

진술한 바와 같이 구조광 화소를 추출하기 위한 차영상법은 두 영상 프레임간의 차이를 구하는 것으로서 배경영상에 차이가 있는 경우에는 영상잡음 문제가 있을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 30 FPS의 영상 획득 속도를 갖는 일반적인 카메라 대신에 200 FPS의 빠른 속도를 갖는 photon focus사의 MV-D640 고속카메라를 사용하여 시스템을 구성하였다(그림 7). 카메라의 해상도는 640×480 이다. 두 영상 프레임간의 시간차는 $5[ms]$ 이며 10회 차적분하는 경우에 총 20장의 영상이 필요하므로 최종적인 거리데이터 획득 속도는 $10[Hz]$ 가 된다.

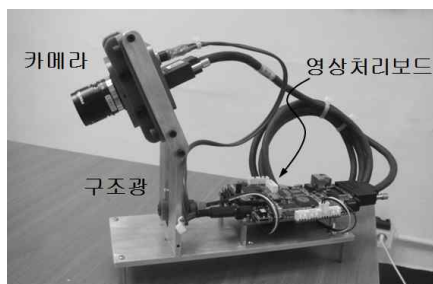


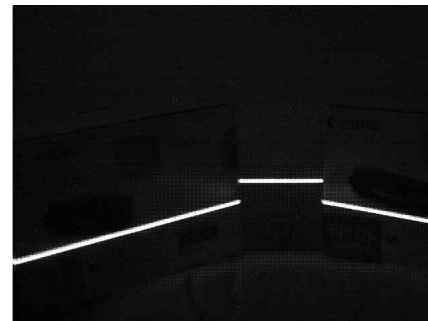
그림 7. 구조광 영상기반 거리측정 시스템
Fig. 7. Ranging system based on structured light image

구조광 발생장치로는 $660[nm]$ 파장의 $5[mw]$ 급 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 영상 획득 과정의 동기화 및 영상 차적분 알고리즘은 임베디드 영상처리 보드에서 처리하고, 차적분 영상으로부터 구조광 픽셀을 검출한 결과만 상위 PC쪽으로 USB 채널을 통해 전송하는 구조로 되어 있다.

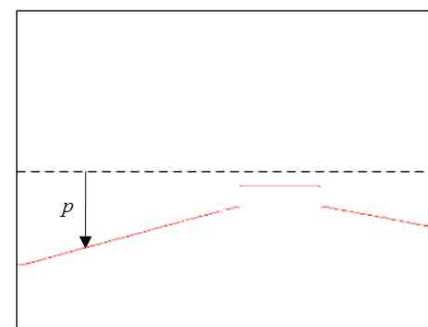
5.2 실험 결과



(a) 원 영상



(b) 10회 차적분 영상



(c) 구조광 위치 측정

그림 8. 구조광 영상기반 거리측정
Fig. 8. Distance measurement based on structured light

다음 그림 8은 본 구조광 영상기반 거리측정 시스템에서의 거리측정 과정을 보여준다. 그림 8 (a)는 물체에 선형의 구조광을 조사한 원 영상이며, 그림 8 (b)는 10회 차적분 영상처리에 의해 얻어진 구조광 화소 추출 영상이다. 이 추출 영상에 수직방향으로 각 화소열

조명잡음에 강인한 구조광 영상기반 거리측정 센서

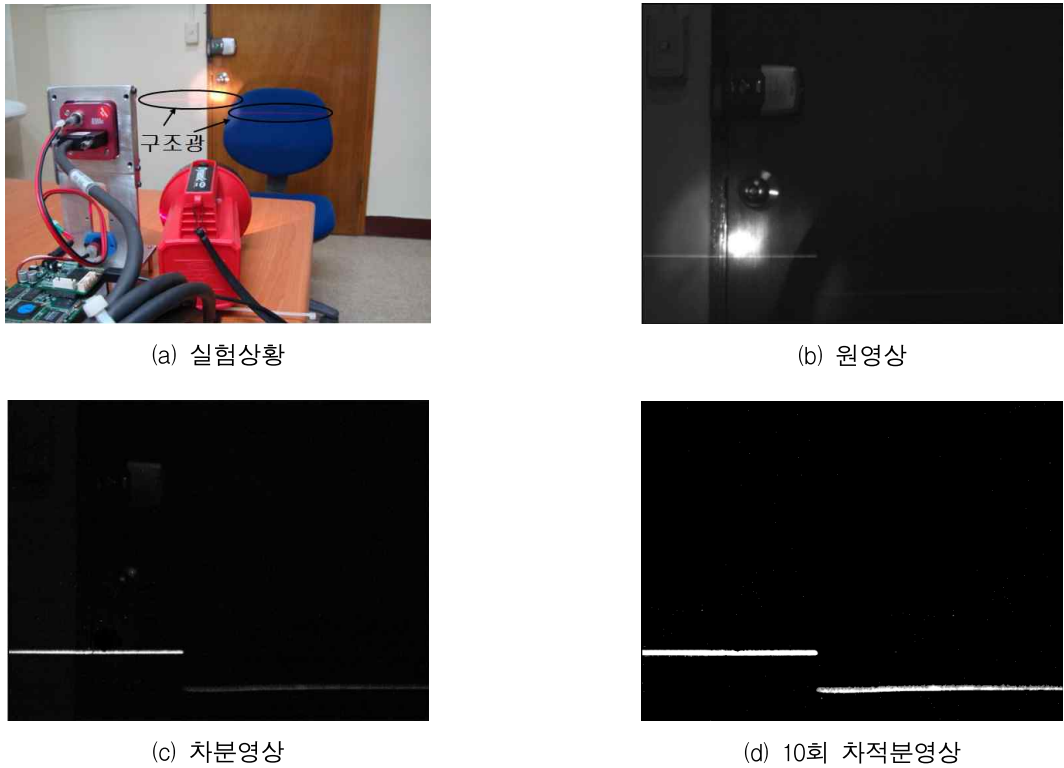


그림 9. 조명잡음 강인성 실험
Fig. 9. Experiment for robustness against illumination noise

을 탐색하여 그림 8 (c)와 같이 구조광 화소의 위치를 측정한다. 점선으로 표시된 중심으로부터 구조광 화소까지의 거리가 물체거리 계산의 기준이 되는 화소 거리 p 가 된다.

다음 그림 9는 본 시스템의 조명잡음에 대한 강인성을 확인하기 위한 것이다. 그림 9 (a)에서 보는 바와 같이 의도적으로 조명잡음을 주기 위해 레이저 구조광 주변에 플래쉬로 밝은 빛을 비추었다. 플래쉬 빛의 중심부에서 측정한 조도는 1,100[lux]이며, 주변환경의 조도는 400[lux]이다.

그림 9 (b)는 본 시스템의 카메라로 구조광과 잡음 조명 주변의 영상을 획득한 원 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 구조광 보다 잡음 조명이 더 밝게 나타나기 때문에 원 영상에서 구조광 화소 부분만을 추출하는 것은 불가능하다. 그림 9 (c)는 구조광 온-오프 모듈레이션에 따라 얻은 영상으로부터 차영상 알고리

즘 처리를 통해 얻은 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 잡음조명을 포함한 배경영상은 제거되고 구조광 화소만 남게 된다. 하지만 구조광 화소의 일부는 밝기가 강하지만, 다른 부분은 밝기가 약한 것을 볼 수 있다. 이는 물체의 반사율, 거리등에 따라 반사 구조광의 밝기가 달라질 수 있기 때문이며, 밝기가 약한 구조광 화소 부분은 구조광 탐색시에 또다른 잡음의 원인이 될 수 있다. 그림 9 (d)는 10장의 시계열 차분 영상들을 적분한 것으로 밝기가 약했던 구조광 화소들이 점차 적분횟수에 따라 점차 밝아지는 것을 볼 수 있다.

본 센서 모듈의 거리계측 성능을 확인하기 위하여 물체를 카메라 영상면에 수평하게 놓고, 0.5~3.0[m] 영역에서 평행이동하면서 카메라 차적분 영상으로부터 구조광 화소 위치 데이터 100세트를 측정하였다. 그리고 이들 구조광화소위치-실제거리 데이터들을 이

용하여 전술한 캘리브레이션 과정을 통해 시스템의 매개변수들을 추정하였다. 다음 그림 10은 측정된 구조광화소위치-실제거리 데이터를 보여주며, 그림 11은 gradient 방법에 의한 캘리브레이션 과정을 보여준다. 수렴 상태에서 추정된 시스템 매개변수들의 값을 표 1에 정리하였다.

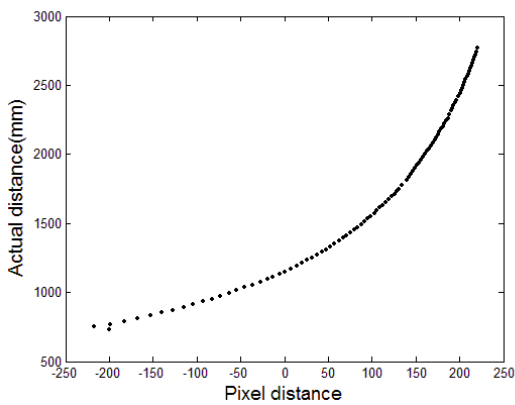


그림 10. 구조광화소위치-실제거리 측정 데이터
Fig. 10. Graph for structured light pixel distance-actual distance

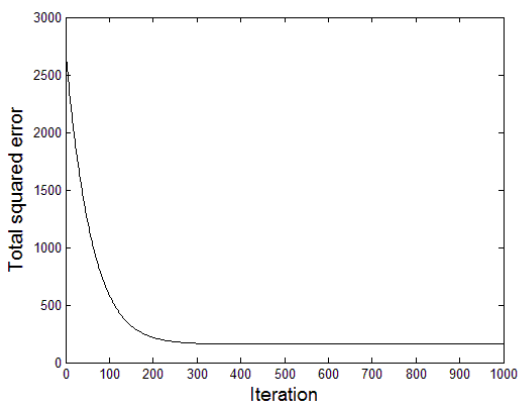
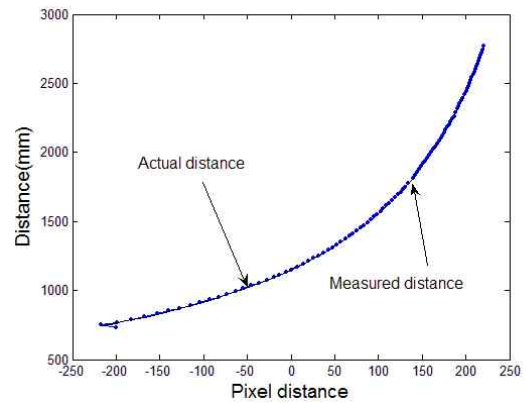


그림 11. Gradient 방법에 의한 캘리브레이션 과정
Fig. 11. Calibration process by gradient method

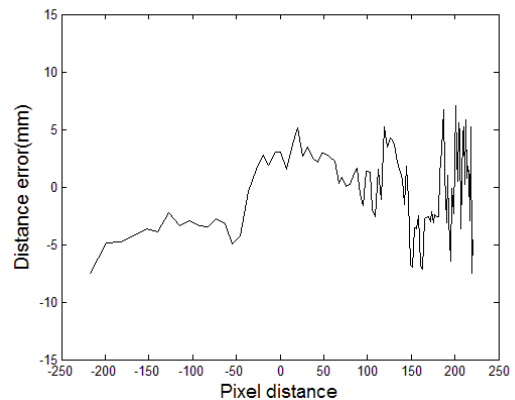
표 1. 수렴 상태에서 매개변수 값
Table 1. Convergent parameter

| 매개변수 | $b(mm)$ | $\theta(deg)$ | $f(mm)$ | $d(mm)$ |
|------|---------|---------------|---------|---------|
| 수렴값 | 375.04 | 21.27 | 957.0 | 186.9 |

다음 그림 12는 캘리브레이션을 통해 구한 매개변수 값들을 적용하여 얻은 측정거리 데이터와 실제거리 데이터를 비교한 것이다. 그림 12 (a), (b)에서 보는 바와 같이 거리측정 한계 $\sim 3[m]$ 에서 오차의 크기는 $\sim 10[mm]$ 를 넘지 않는다.



(a) 거리 측정 결과



(b) 거리 측정오차

그림 12. 물체거리 측정결과
Fig. 12. Result of object distance measurement

6. 결론

구조광 영상기반 거리측정 방식은 물체거리에 따른 레이저 구조광의 영상왜곡을 측정함으로써 거리를 측정하는 것이다. 이 방식은 거리계산이 간단하며, 한 장의 영상으로 렌즈의 시야각에 해당하는 넓은 폭의 거리정보를 동시에 얻을 수 있으므로, 단방향의 거리만

을 측정하는 초음파 센서, 혹은 PSD 센서에 비해 매우 효율적으로 물체 거리맵을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 특히 근래에는 반도체 레이저 발생장치와 저렴한 영상센서의 등장으로 매우 경제적인 구현이 가능해졌다.

본 논문에서는 주변 조명잡음에 강인한 구조광 영상처리 기반의 거리측정 센서 모듈을 개발하였다. 선형의 구조광 조사를 위해 모터-제어기와 같은 기계적인 스캔을 피하고 실린더 렌즈로 점형 레이저를 선형으로 변환하는 방식을 이용하였다. 선형으로 변환하는 과정에서 구조광 에너지 밀도가 낮아지므로, 주변조명잡음에 대한 강인성을 확보하고 구조광 추출을 용이하게 하기 위한 차적분 영상처리 알고리즘을 제안하고, 실험을 통해 확인하였다. 차적분 영상처리는 카메라 위치변동에 의해 배경영상에 차이가 생기는 경우 영상잡음이 생길 수 있으므로, 두 영상 프레임간의 시간차가 적은 고속 카메라 및 고속 영상처리 하드웨어를 개발하였다.

References

[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] 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.
 [4] J. Leonard and H. Durrant-Whyte, Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation, Kluwer academic publisher, 1992.

[5] S. Cameron and P. Probert, Advanced Guided Vehicles,-Aspects of the Oxford AGV Project, World Scientific, 1994.
 [6] <http://www.sick.com>.
 [7] 노동기, 김근우, 이범희, "Structured Light 기법을 이용한 이동로봇의 상대위치 추정 알고리즘 연구," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제11권 제8호, pp. 678-687, 2005.
 [8] 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.
 [9] 이수영, 김성도, 홍영진, 서진호, "레이저 구조광 영상기반 능동 거리측정 시스템," 한국자동제어학술회의(KACC 2009) 부산, 2009.

◇ 저자소개 ◇



신 진(申 鎭)

1984년 10월 19일생. 2010년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2010년 3월~현재 서울과학기술대학교 산업대학원 석사과정 재학중.
 관심분야 : 로봇비전, 전방향 영상시스템



이수영(李壽榮)

1964년 10월 2일생. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1995~1999년 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997~1998년 Univ. of Southern California 박사 후과정. 1999~2007년 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수.
 관심분야 : 로봇비전, 이동로봇시스템