

초음파 센서와 카메라를 이용한 거리측정 시스템 설계

문창수 · 도용태*†

Design of range measurement systems using a sonar and a camera

Changsoo Moon and Yongtae Do*†

Abstract

In this paper range measurement systems are designed using an ultrasonic sensor and a camera. An ultrasonic sensor provides the range measurement to a target quickly and simply but its low resolution is a disadvantage. We tackle this problem by employing a camera. Instead using a stereoscopic sensor, which is widely used for 3D sensing but requires a computationally intensive stereo matching, the range is measured by focusing and structured lighting. In focusing a straightforward focusing measure named as MMDH(min-max difference in histogram) is proposed and compared with existing techniques. In the method of structure lighting, light stripes projected by a beam projector are used. Compared to those using a laser beam projector, the designed system can be constructed easily in a low-budget. The system equation is derived by analysing the sensor geometry. A sensing scenario using the systems designed is in two steps. First, when better accuracy is required, measurements by ultrasonic sensing and focusing of a camera are fused by MLE(maximum likelihood estimation). Second, when the target is in a range of particular interest, a range map of the target scene is obtained by using structured lighting technique. The systems designed showed measurement accuracy up to 0.3[mm] approximately in experiments.

Key Words : sonar, vision, range measurement, sensor fusion, focusing, structured light

1. 서 론

로봇을 비롯한 자동화 장치들에서 목표물까지의 거리측정은 중요하다. 거리는 스테레오 시각과 같은 수동적 방법이나 레이저, 초음파 등을 이용한 능동적 방법에 의해 측정될 수 있다^[1]. 본 논문에서는 초음파 센서와 단수의 카메라를 사용한 다중 거리측정 장치를 설계한다. 설계시 중요하게 고려된 것은 동종의 기존 장치들에 비해서 적은 예산으로 장치를 구축하는 것이다. 또 구축된 장치의 보정기법과 중복으로 사용된 센서들을 효율적으로 활용하는 방안도 제시한다. 초음파를 이용한 거리측정의 경우, 널리 사용되고 있는 비행시간(ToF : time of flight)측정법을 사용하였다. 이 방법은 간단하고 빠르게 목표물까지의 거리를 측정할 수 있게

한다. 그러나 측정의 정확도가 환경에 의존적이며^[2,3], 해상도가 낮다는 단점이 있다. 더욱이 해상도를 높이기 위해 음파의 주파수를 높이면, 공기중 감쇄가 급격히 증가하여 측정가능 거리가 짧아진다. 우리는 이러한 문제를 카메라의 사용으로 해결하고자 하였다. 단수의 카메라를 사용하지 않고 초점화(focusing)와 구조화된 조명(structured lighting)의 두가지 방식으로 거리를 측정한다. 초점화 방식의 경우, 카메라에서 목표물까지의 거리에 따라 영상의 초점이 달라지는 원리를 이용한다^[4,5]. 본 논문에서는 스텝모터에 의해 카메라의 렌즈와 영상면사이의 거리를 변화시키면서 초점화의 정도(measure of focusing)를 측정하는 방식으로 목표물까지의 거리를 계측하였다. 특히 히스토그램상에서 최대값과 최소값의 차이에 기준하여 초점화의 정도를 추정하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 기법과 비교한다. 구조화된 조명은 인위적으로 만들어진 광패턴(light pattern)을 목표물 표면에 조사하여 스테레오 영상의 정합과정을 단순화하기 위한 용도로 사용되거나^[6], 카메라와 조명원, 그리고 목표물이 만드는 삼각형에 의한

(주)대원G.S.I. 기술연구소 (Research and Development Institute, Daewon GSI Co.)

*대구대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Daegu University)

†Corresponding author: ytdo@daegu.ac.kr

(Received : February 16, 2005, Accepted : March 7, 2005)

거리측정(triangulation)의 용도로 사용되어 왔다^[7,8]. 후자의 경우, 이동로봇에 레이저를 고정시켜 로봇의 전방에 존재하는 장애물을 검출하거나^[7], 회전거울을 사용하여 레이저 빔의 방사각을 제어하는 방식으로 전방을 스캔하기 위해 사용된다^[8]. 본 논문에서는 고가의 레이저 대신 주변에서 쉽게 구할 수 있는 빔 프로젝터(beam projector)를 사용하여 조명패턴을 만들고 목표물에 조사한 후, 카메라에 의한 관측을 통하여 거리지도(range map)를 얻는다. 빔 프로젝터와 카메라 영상, 그리고 거리와의 관계식은 센서 장치의 기하학적 구조를 해석하여 얻는다.

본 논문에서 사용된 물리적 센서는 2개이지만, 카메라의 경우 거리측정이 초점화와 구조화된 조명을 이용한 삼각법에 의하여 각각 별도로 이루어지므로, Henderson 등이 제안한 논리적 센서(logical sensor)^[9]의 개념을 적용하면 3개의 센서가 사용된다고 볼 수 있다. 이후 이들 3개의 물리적, 혹은 논리적 센서를 각각 초음파 센서, 초점화 센서, 그리고 구조화된 조명 센서라 부른다. 고안된 센서 측정 구조는 우선 초음파 센서를 사용하여 목표물까지의 거리를 측정하되, 필요시에는 초점화 센서의 측정치와 융합하여 보다 정확한 거리값을 얻거나, 구조화된 조명 센서를 사용하여 거리지도를 얻는 것이다. 각 센서들은 전자식 버니어 캘리퍼스(vernier calipers)를 이용하여 제작된 기준거리 조절장치를 사용하여 그 성능을 평가하였다.

2. 거리측정을 위한 센서장치의 설계

2.1. 초음파 센서

초음파 센서를 사용한 거리 측정법에는 여러 가지가 있으나, 로봇의 응용영역에서는 일단의 음파열(sonic wave trains)이 센서로부터 방사된 후 목표물에 반사되어 돌아올 때까지의 비행시간, 즉 TOF를 측정하는 방식이 널리 이용된다. 이 때 TOF T 로부터 목표물까지의 거리 L 은 아래의 식으로부터 구할 수 있다. 여기서 u 는 음파의 진행속도로, 기지의 거리에 있는 목표물을 이용하여 결정될 수 있다.

$$L = u \frac{T}{2} \quad (1)$$

본 논문에서 사용한 초음파 센서는 Polaroid사의 6500series Ranging Module과 600series의 트랜스듀서(transducers)로 구성된다. 이 장치의 특징은 송수신기 일체형의 트랜스듀서로 49.4[kHz]의 주파수를 가진 16 cycles의 펄스를 송수신하며, 유효측정 거리는 대략

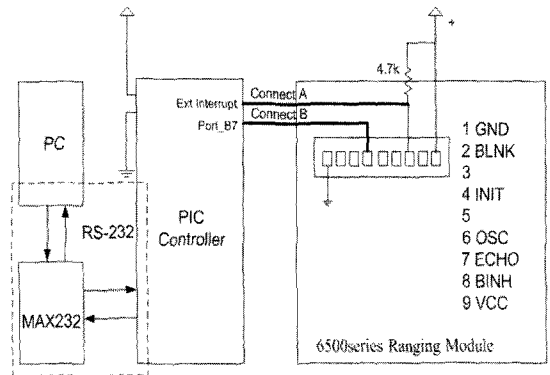


그림 1. 초음파 센서 장치의 구성
Fig. 1. Configuration of an ultrasonic ranger.

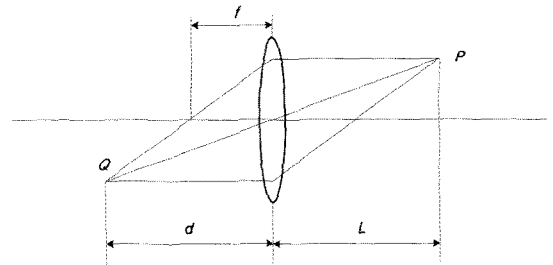


그림 2. 초점화에 의한 거리측정을 위한 렌즈 모델
Fig. 2. Lens model for the range measurement by focusing.

0.15[m]에서 10[m]까지이다. 우리는 초음파 센서를 PIC 콘트롤러와 연결한 후 TOF를 계수하고, 이를 RS-232 직렬통신으로 PC로 전송하였다. PC에서는 센서의 동작을 제어한다. 그림 1은 설계된 초음파 센서의 구성을 보여준다.

2.2. 초점화 센서

초점이 맞는 영상(focused image)이란 영상의 흐려짐이 최소가 되는 상태를 의미한다. 그림 2는 카메라에서 초점이 맺혀지는 구조를 보여준다. Gauss의 얇은 렌즈모델(thin lens model)에 따르면, 3차원 목표점 P 까지의 거리 L 은 렌즈의 초점거리 f 에 대해 렌즈에서 영상면까지의 거리 d 와 식 (2)의 관계를 가진다. 즉, P 가 영상면에 최소점 Q 로 나타나기 위한 렌즈와 영상면 사이의 거리는 유일하다. 그림 3은 초점이 맺어진 영상과 그렇지 못한 영상의 예를 보여준다.

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

그림 3에서 볼 수 있듯이 초점이 잘 맞는 영상에서

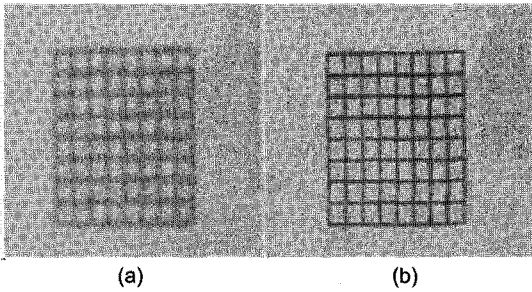


그림 3. 초점화의 예: (a) 초점이 맞지 않는 영상, (b) 초점이 맞는 영상
 Fig. 3. Example of focusing: (a) Defocused image, (b) Focused image.

는 어두운 부분과 밝은 부분사이의 명암차이가 뚜렷하다. 즉, 고주파 성분이 두드러진다. 이러한 특성은 영상의 초점화 정도(measure of focusing)를 정의하는데 이용될 수 있다. 예를 들어 초점화 정도를 결정하는데 Sobel 연산자를 이용할 수 있다^[10]. Sobel 연산자는 영상내 경계 검출(edge detection)에 널리 사용되는데, 경계는 고주파 성분이며, 초점이 잘 맞은 영상일수록 많은 경계 화소를 갖게 되므로 이를 계수하여 초점화의 정도를 추정할 수 있다. Laplacian 연산자는 영상의 2차 미분을 위하여 사용되며, 영점검출(zero crossing detection)을 수행하여 경계값을 찾는 데 사용할 수 있다. Laplacian 연산자는 카메라의 초점화에 의한 거리계측 시 다른 방법들에 비하여 장점이 많다는 조사보고가 있었고^[11], 자동 초점화를 위해 가장 널리 사용된다^[10-13].

보다 직접적으로 초점화의 정도를 얻기 위한 방법으로 히스토그램(histogram)상의 최대와 최소화 값들의 차이를 계산하는 방법을 생각할 수 있다. 즉, 초점이 잘 맞는 영상에서는 최대값과 최소값 사이의 차이가 크고, 반대의 경우에는 그 차이가 작아짐을 이용하는 것이다. 우리는 이를 위해 영상내 가장 밝은 일정 수의 화소들과 가장 어두운 일정 수의 화소들 각각의 평균값들을 얻고, 이들의 차이를 구하는 방법을 사용하고, 이를 MMDH(min-max difference in histogram)라 부른다. 아래 식 (3)은 제안된 MMDH 기법을 서술한다.

$$MMDH = \overline{max_{r\%}} - \overline{min_{r\%}} \quad (3)$$

단, $\overline{max_{r\%}}$ 와 $\overline{min_{r\%}}$ 는 각각 히스토그램상에서 상위와 하위 $r\%$ 에 해당되는 화소값들의 평균이다. 제안한 MMDH은 임계치의 결정이 필요하지 않고, 계산량이 단지 히스토그램의 부분적 평균에 불과하여 실행이 빠르다. 연산에 필요한 화소수, 즉 r 는 경우에 따라 다르겠지만, 해상도가 충분히 큰 대부분의 영상들에

서 $r=1$ 이면 충분하다. 실제 영상의 히스토그램 $H(i)$, $i=0, 2, \dots, 255$ 는 이산적이므로 전체 화소수의 1%가 정확하게 특정 밝기까지의 화소수 합과 일치하기를 기대하기는 어렵다. 따라서 $r \times c$ 크기의 영상에 대하여 $\overline{max_{r\%}}$ 과 $\overline{min_{r\%}}$ 는 아래 식 (4)에 의하여 구한다.

$$\overline{min_{1\%}} = (0.01rc)^{-1} \left[\sum_{i=0}^n iH(i) + \left\{ 0.01rc - \sum_{i=0}^n H(i) \right\} (i+1) \right] \quad (4.a)$$

여기서 n 은 $\sum_{i=0}^n H(i) < 0.01rc$ 와 $\sum_{i=0}^{n+1} H(i) > 0.01rc$ 를 동시에 만족하는 임의의 값이다.

$$\overline{max_{1\%}} = (0.01rc)^{-1} \left[\sum_{i=255-n}^{255} iH(i) + \left\{ 0.01rc - \sum_{i=255-n}^{255} H(i) \right\} (i-1) \right] \quad (4.b)$$

여기서 n 은 $\sum_{i=255-n}^{255} H(i) < 0.01rc$ 와 $\sum_{i=255-n-1}^{255} H(i) >$

$0.01rc$ 를 동시에 만족하는 임의의 값이다.

초점화 센서의 거리 측정은 주어진 목표물까지의 거리에 대해 초점화의 정도가 최대가 되는 렌즈와 영상면 사이의 거리를 얻음으로서 구할 수 있다. 우리는 이를 위하여 그림 4에서와 같이 설계된 렌즈위치의 조절

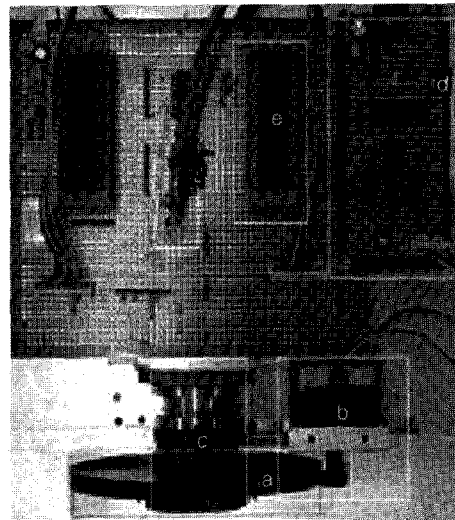


그림 4. 초점화 센서장치: (a) 렌즈기어 (b) 스텝모터 (c) 렌즈 (d) 모터 드라이버 (e) PIC 콘트롤러
 Fig. 4. Focusing Sensor: (a) Lens gear, (b) Step motor, (c) Lens, (d) Motor Driver, (e) PIC Controller.

장치를 제작하였다. 제작된 장치는 기어, 스텝모터, 렌즈, 모터 드라이브, 그리고 PIC 컨트롤러로 구성되어 있다. 1:10비율의 두 축이 평행하고 플라스틱 재질인 스퍼기어를 사용하여 0.045[Degree]의 회전해상도를 얻을 수 있었다. 카메라 렌즈는 16 mm Cosmocar 제품이며, 모터 드라이브는 전류증폭을 위한 SLA7024와 정전류 모터 구동을 위한 L297을 사용하였다. 초점화의 정도가 최대일 때 렌즈의 회전각도 θ [Degree]와 물체까지의 거리 L [mm]사이의 관계는 실험적 해석을 통하여 식 (5)와 같은 2차 다항식으로 근사화하였다. 여기서 미지의 계수 k_1, k_2 , 그리고 k_3 는 기지의 L_0 와 $\theta_0, i = 1, 2, \dots, N, N \geq 3$ 을 이용하여 최소제곱오차법(least error squares)에 의해 구할 수 있다.

$$L = k_1 \theta^2 + k_2 \theta + k_3 \quad (5)$$

2.3. 구조화된 조명 센서

구조화된 조명(structured lighting)은 초점화와 같이 단수의 카메라로 목표물까지의 거리를 측정할 수 있게 한다. 흔히 사용되는 방식은 레이저에 의한 점(spot), 혹은 선(stripe) 광선을 목표물에 조사한 후 이를 카메라 영상에서 찾아 식 (6)에 의하여 거리정보로 환산하는 것이다¹¹.

$$L = B/(c \cdot d \cdot \tan \theta) \quad (6)$$

단, B 는 레이저 광원과 카메라 사이의 간격이고, d 는 카메라의 렌즈와 영상면사이의 거리로 둘 모두 보정을 통하여 결정되어야 하는 값이다. 또 θ 는 레이저 광선의 조사각도이고, c 는 레이저 광선의 카메라 영상내 위치이다. 이 때 회전거울을 이용하여 광선의

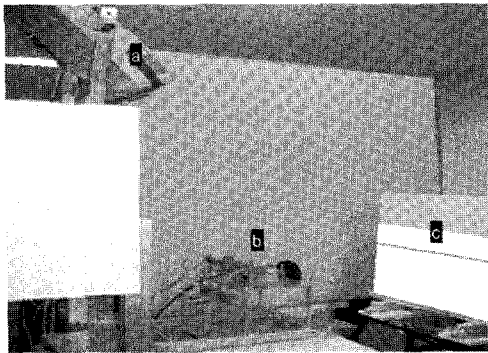


그림 5. 구조화된 조명 센서의 설치: (a) 빔 프로젝터, (b) 카메라, (c) 투영된 선광패턴
Fig. 5. Construction of a structured lighting sensor: (a) Beam projector, (b) Camera, (c) Projected stripe light pattern.

조사 각도를 조금씩 변화시키면서 목표물의 표면을 스캔하면 거리지도(range map)을 얻을 수 있다. 이러한 방식의 실제적 문제점은 장치의 제작에 상당한 비용이 소요된다는 것이다.

본 논문에서는 그림 5에 보인 바와 같이 빔 프로젝터(beam projector)를 사용하여 구조화된 조명을 얻는다. 빔 프로젝터의 사용이 레이저 장치에 비해서 가지는 장단점은 그 가격과 성능면에서 명확하다. 우리는 이미 빔 프로젝터를 스테레오 시각장치의 3차원 보정을 위한 제어점의 획득과정을 자동화하는 데 성공적으로 사용한 바 있다^{14,15}.

구조화된 조명센서 사용의 첫 번째 단계는 빔 프로젝터의 선광(stripe light)을 PC로 제어하는 것이다. 두 번째 단계는 빔 프로젝터에 의해서 조사된 광을 카메라 영상에서 경계검출(edge detection) 과정을 통하여 찾는 것이고, 마지막으로 그 위치에 해당하는 거리를 계산한다. 전체 거리지도를 얻기 위해서는 모니터 상에서 선의 위치를 조금씩 하강시키면서 상기의 계측 절차를 되풀이 하게 된다. 그림 6은 PC 모니터상에서 만들어진 선의 위치 m 과 이 선이 프로젝터에 의하여 광으로 만들어진 후 목표물 표면상에 조사된 위치 p , 그리고 카메라 영상에서 검출된 선의 위치 c 사이의 관계를 보여준다.

측정 모델은 그림 7과 같은 기하학적 해석을 통하여 얻을 수 있다. 방위각 α 로 설치된 빔 프로젝터의 중심으로부터 θ 각도로 조사되는 선광은 그림에서 볼 수 있듯이 프로젝터 표면에서 m 의 위치이고, 이는 곧 PC 모니터상의 선의 위치와 일치한다. 이 선광은 카메라로부터 L 의 거리에 있는 목표물의 표면상 p 위치에 조사되고, 이는 그림 6에서 보인 바와 같이 카메라 영상의

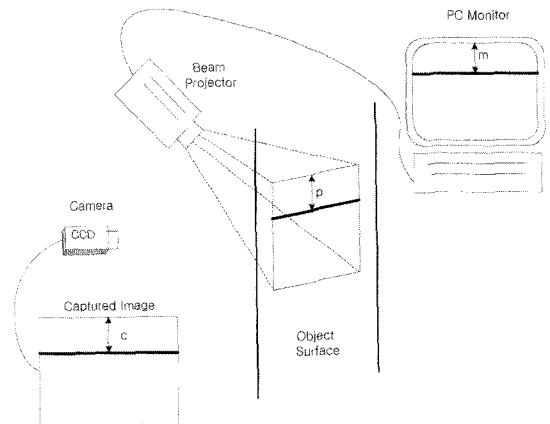


그림 6. 선광의 발생과 검출
Fig. 6. Generation and detection of a stripe light.

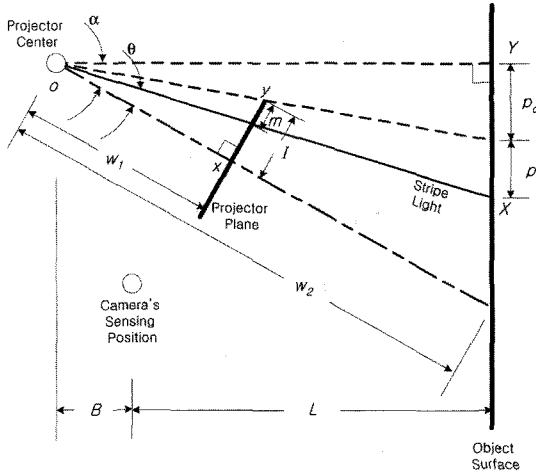


그림 7. 구조화된 조명 센서의 기하학적 모델
Fig. 7. Geometric model of structured lighting sensor.

c 위치에 맞힌다. 직각 삼각형 Δoxy 에서 m 과 θ 는 다음과 같이 관계되어 지고

$$m = I - w_1 \tan \theta \quad (7)$$

I 와 w_1 이 상수임을 감안하면 다음의 식에 이른다.

$$\tan \theta = k_1 m + k_2 \quad (8)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 미지의 계수이다. 이 때 m 에 대응하는 p 값을 구하기 위하여 직각 삼각형 ΔoXY 를 살펴 보면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} p + p_0 &= (B + L) \tan(\alpha - \theta) \\ &= (B + L) \frac{\tan \alpha - \tan \theta}{1 + \tan \alpha \tan \theta} \end{aligned} \quad (9)$$

여기에 식 (8)을 대입한 후 B 와 α 가 상수임을 고려하여 정리하면 식 (10)을 얻는다.

$$p = \frac{k_3 m + k_4 L + k_5 m L + k_6}{k_7 m + k_8} \quad (10)$$

여기서 $\{k_i | i = 3, 4, \dots, 8\}$ 는 미지의 계수이다. 우리가 얻기 원하는 식은 거리 L 에 대한 식이므로, 식 (10)을 L 에 대하여 다시 쓰면 아래와 같다.

$$L = \frac{k_7 m p + k_8 p - k_3 m - k_6}{k_5 m + k_4} \quad (11)$$

목표물 표면과 카메라 영상면 사이의 선형 대응을 가정하면, 목표물위 선광의 위치 p 와 이에 해당하는 영상에서의 선의 위치 c 사이에는 다음과 같은 관계가

성립한다.

$$\begin{pmatrix} sp \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서 $\{t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}\}$ 는 변환행렬 요소이고, s 는 스케일 계수이다. 식 (12)는 아래와 같이 다시 쓸 수 있고,

$$p = \frac{t_{11} c + t_{12}}{t_{21} c + t_{22}} \quad (13)$$

이를 식 (11)에 대입하면 최종적으로 아래 식에 이른다.

$$L = \frac{g_5 m + g_6 c + g_7 m c + g_8}{g_1 m + g_2 c + g_3 m c + g_4} \quad (14)$$

얻어진 식에서 미지의 계수 $\{g_i | i = 1, 2, \dots, 8\}$ 는 식의 유도중에 사용된 중간계수들과 장치의 상수들로부터 정의된다. 일반성의 손실없이 $g_8 = 1$ 로 둘 수 있으며, 이 때 나머지 계수들은 기지의 거리 L_i 에 대한 m_i 와 c_i , $i = 1, 2, \dots, N$, $N \geq 7$ 을 이용하여 다음 식의 해를 구함으로써 결정될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m_1 L_1 & c_1 L_1 & m_1 c_1 L_1 & L_1 - m_1 - c_1 - m_1 c_1 \\ m_2 L_2 & c_2 L_2 & m_2 c_2 L_2 & L_2 - m_2 - c_2 - m_2 c_2 \\ & & \dots & \\ m_N L_N & c_N L_N & m_N c_N L_N & L_N - m_N - c_N - m_N c_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

3. 다중 센서 장치의 제어기법

설계된 3개의 물리적, 혹은 논리적 센서는 목표물에 대한 거리정보를 잉여로(redundant), 혹은 보완적(compensatory)으로 제공한다. 이제 이들 3개의 센서를 효율적으로 제어하고, 계측치를 활용하는 방법을 논한다. 우리가 로봇의 작업을 가정한 후 고려한 센서동작의 계획은 그림 8과 같다. 로봇은 자신의 이동이나 동작에 의해 목표물이나 환경에 대해 변화하는 거리를 가진다. 만약 목표물이 충분히 먼 거리에 존재해서 로봇과 작용할 수 없는 곳에 존재할 때는 비교적 센서의 측정이 부정확하더라도 문제가 되지 않으므로 간단한 센서에 의한 계측만으로 충분하다. 그러나 로봇과 목표물의 거리가 임의의 거리 L_i 이내로 가까워진 경우에는 보다 신뢰성있고 정확한 계측이 필요할 수 있다. 특히 로봇의 작업반경과 같은 특정 거리 L_2 내에 목표물이 있어서 목표물에 대한 3차원적인 작업이 필요한 경우에는 조밀한 거리지도가 필요하게 된다. 그림 8에서 볼 수

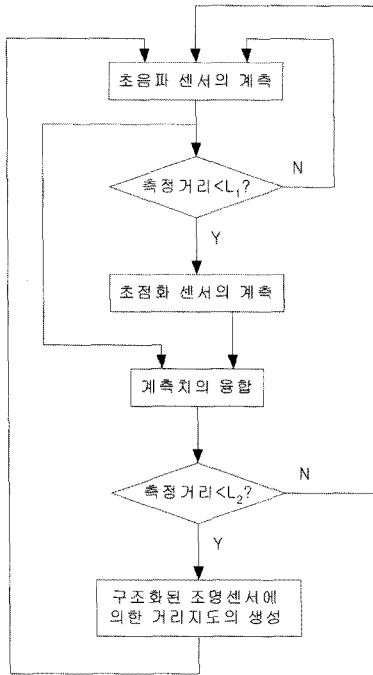


그림 8. 다중 센서의 운용
Fig. 8. Multiple sensor control.

있듯이 초음파 센서는 다른 두 센서들의 동작시점을 결정하는 역할로 사용되었다. 이는 초음파 센서의 계측 속도가 빠르고 측정거리가 비교적 길고 계산비용이 적기 때문으로, 초음파 센서의 계측치를 기준으로 하여 다른 센서의 동작을 시작할 순간을 결정하기 위한 것이다.

보다 정확한 계측을 위하여 잉여센서의 융합(redundant sensor fusion)이 널리 사용되고 있다. 우리는 초음파 센서와 초점화 센서를 융합한다. 이 때 초음파 센서는 초점화 센서의 동작 시점을 결정하는 역할외에, 초점화 센서가 최고의 초점화 정도를 검색하는 기준위치를 제공한다. 설계된 초점화 센서는 렌즈를 조금씩 회전하면서 초점화의 정도를 확인하기 위한 연산자물 영상에 적용하게 되므로 계측의 시간이 상당히 오래 걸린다. 이 때 초음파 센서가 목표물까지의 대략적인 거리를 제공하면, 초점화는 그 거리부근에서 행하여 질 수 있어 시간을 단축시킬 수 있게 된다. 잉여센서의 융합은 여러 가지 방법에 의해 행하여 질 수 있으며, 특히 MLE(maximum likelihood estimation)는 확률적 의미에서 최적의 융합결과를 제공한다^[16]. Krotkov 등은 스테레오 시각과 초점화 센서를 MLE 기법에 의해 융합하여 좋은 결과를 얻었으나^[17], 사용된 두 계측치가

모두 동종의 센서, 즉 카메라에 기반한 것이어서 상호 보완의 효과는 크지 않다. 초음파 센서와 초점화 센서 각각의 거리측정치를 다음 식 (16.a)와 (16.b)같이 표현한다고 하였을 때, MLE에 의한 융합은 식 (17)과 같이 표현될 수 있다.

$$L_S = L + n_S \tag{16.a}$$

$$L_F = L + n_F \tag{16.b}$$

$$\hat{L} = k_1 L_S + k_2 L_F \tag{17}$$

이 때 n_S 와 n_F 는 각 센서의 가산 잡음으로 σ_S^2 와 σ_F^2 의 분산을 가진다고 하면, k_1 과 k_2 는 식 (18)과 같이 결정된다.

$$k_1 = \sigma_F^2 / (\sigma_S^2 + \sigma_F^2) \tag{18.a}$$

$$k_2 = 1 - k_1 \tag{18.b}$$

4. 실험의 결과

설계된 센서들의 측정 정확도를 알아내기 위해서는 기준이 되는 정밀한 거리조절 장치가 필요하다. 우리는 0.01[mm] 단위의 해상도를 가지는 전자식 버니어 캘리퍼스와 평판 유리를 사용하여 실험용 거리조절 장치를 제작하였으며, 이는 그림 9에 보인 바와 같다. 제작된 장치의 최대 이동거리는 캘리퍼스의 최대 측정거리인 150[mm]이다.

초음파 센서의 정확도를 측정하기 위하여 기준거리 조절장치를 센서로부터 300[mm]의 거리에 두고 2

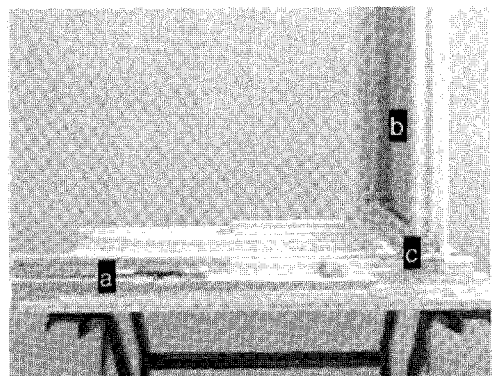


그림 9. 실험용 기준거리 조절장치: (a) 전자식 버니어캘리퍼스, (b) 유리판, (c) 알루미늄 프로파일
Fig. 9. Reference distance control system for experiment: (a) Electronic vernier calipers, (b) Glass plate, (c) Aluminum profile.

[mm]씩 450[mm]의 위치까지 유리 평판을 이동시키면서 센서를 동작시켰다. 측정오차를 줄이기 위하여, 각 거리마다 100회씩 센서값을 읽고 평균하였다. 오차 e 를 아래 식 (19)와 같이 정의할 때, 실험결과 1.08[mm]의 오차를 얻을 수 있었다.

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |L_i - \hat{L}_i|^2} \quad (19)$$

초점화 센서의 경우 2.2절에서 서술된 연산자를 적용하여 초점화의 정도가 가장 큰 렌즈의 회전각을 기준으로 거리를 결정하였다. 그림 10은 특정 거리에 대해 렌즈를 1[Degree] 단위로 회전시키면서 연산자를 적용한 결과의 예를 보여준다. 기존의 Laplacian 연산자와 제안된 MMDH 연산자가 Sobel 연산자보다 날카로운 최고치를 보였다. 초음파 센서의 실험에서와 같이 300[mm]에서 450[mm]까지 2[mm] 간격으로 기준거리를 변경시키면서 초점화에 의한 거리계측 실험을 한 결과는 표 1에 요약한 바와 같다. 표에서 볼 수 있듯이 기존의 Laplacian 연산자가 최저의 오차를 보였다. 특히 Laplacian 연산자에 의한 초점화와 초음파 센서의 측정치를 식 (17)의 방식으로 융합한 결과의 오차는 약

0.79[mm]로 초음파 센서나 Laplacian 연산자에 의한 초점화 센서 단독에 의한 측정치의 정확도보다 높았다. 그러나 처리시간을 고려하면 본논문에서 제안한 MMDH가 최소였고, Laplacian은 이에 비해 훨씬 긴 시간을 필요로 하였다. 특히 Laplacian 연산자와 Sobel 연산자가 경계화소 판정을 위한 임계치의 설정에 성능이 의존적이고, 최적의 임계치를 찾기 위해 프로그래머가 시행착오를 거치는 시간까지 고려하면 제안된 MMDH기법은 현실적으로 간편하고 빠르다.

빔 프로젝터를 사용한 구조화된 조명 센서의 성능도 실험을 통하여 확인하였다. 카메라로부터 300[mm]에서 450[mm] 사이의 거리에 전자식 버니어 캘리퍼스를 이용한 기준거리 조절장치를 이동하면서 335개의 데이터를 얻고 식 (14)를 보정하였다. 다시 같은 거리범위 내에 있되 보정에 사용하지 않은 327개의 다른 데이터를 얻고 보정된 장치를 실험하였다. 그 결과, 식 (19)로 계산되는 거리 측정의 오차는 0.32[mm]였다.

구조화된 조명 센서의 가장 큰 장점은 거리 지도를 얻을 수 있다는 점이다. 그림 11은 실험을 통하여 얻어진 거리 지도의 예를 보여준다. 원뿔형의 물체는 좌우의 높이가 다른 홈안에 위치하고 있다. PC 모니터 상

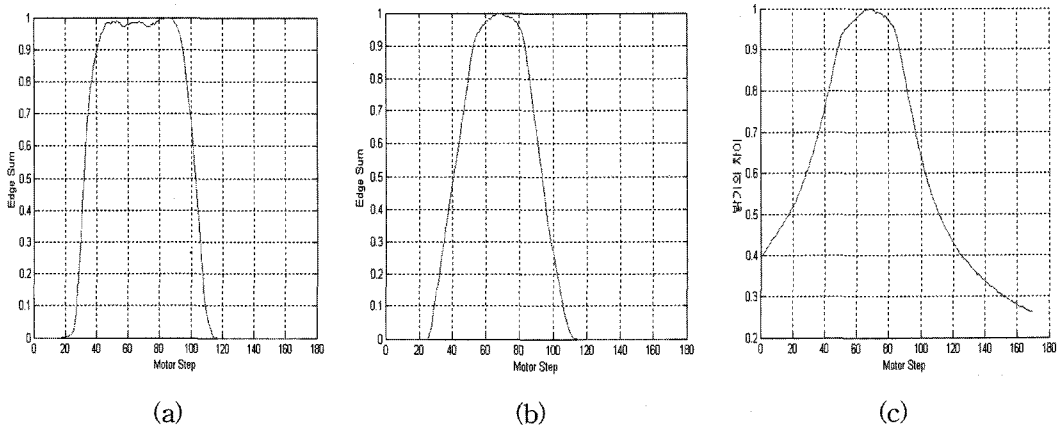


그림 10. 초점화의 정도를 판정하기 위한 연산자의 적용 결과: (a) Sobel 연산자, (b) Laplacian 연산자, (c) MMDH 연산자
 Fig. 10. Results of applying operators for focusing measure: (a) Sobel operator, (b) Laplacian operator, (c) MMDH operator.

표 1. 초점화의 정도를 판정하기 위한 연산자의 성능 비교
 Table 1. Performance comparison of operators used for focusing measure

Operators	Calibrated Measurement Equations	Error [mm]	Relative Processing Time
Sobel	$L = 0.0312\theta^2 - 2.1698\theta + 291.5230$	2.07	6.4
Laplacian	$L = 0.0369\theta^2 - 2.3888\theta + 345.8636$	1.13	7.7
MMDH	$L = 0.0361\theta^2 - 3.0545\theta + 326.6171$	1.78	1.0

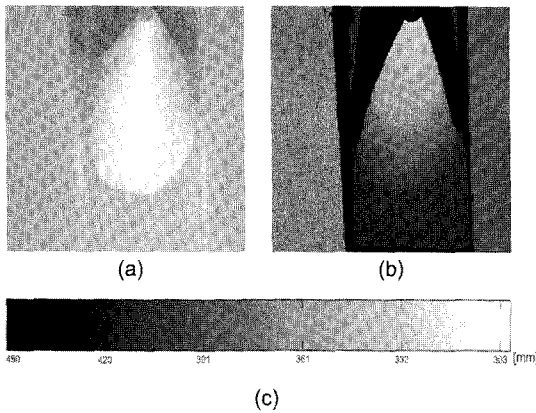


그림 11. 구조화된 조명 센서에 의하여 생성된 거리지도의 예: (a) 실영상, (b) 거리지도, (c) 거리와 명암의 대응관계
 Fig. 11. Example of range map constructed by structured lighting sensor: (a) Real image, (b) Range map, (c) Mapping between range and pixel brightness.

에서 횡선의 패턴을 만들고 빔 프로젝터로 물체에 투영한 후 카메라 영상에서 검출된 선의 위치로 거리계산하였다. 횡선 패턴을 4화소씩 아래로 이동하면서 얻은 총 123개의 영상에서 같은 작업을 되풀이 하여 전체 거리지도를 얻는데 99초가 걸렸다.

5. 결 론

본 논문에서는 초음파 센서와 카메라를 사용한 거리 측정 시스템을 설계하였다. 초음파 센서는 다른 두 센서를 활용하기 위한 기준치를 제공하는 용도로 사용되었으며, 기존의 TOF 측정법을 그대로 사용하였다. 카메라의 경우 사용된 계측 기법에 따라 초점화 센서와 구조화된 조명 센서로 독립적인 두개의 논리적 센서로 정의되었다. 먼저 초점화 센서의 경우, 스텝 모터로 카메라의 렌즈를 회전시키면서 영상의 초점이 가장 맞추어졌을 때를 찾아 물체까지의 거리를 추정하였다. 초음파 센서와 마찬가지로 초점화 센서는 가장 가까운 목표물까지의 단순 거리를 얻기 위하여 사용하였으며, 필요시에는 초음파 센서의 측정치와 MLE에 의하여 융합하여 보다 신뢰성있는 측정치를 얻을 수 있었다. 영상의 초점화 정도를 추정하기 위한 기법으로는 기존의 Sobel 연산자나 Laplacian 연산자에 의한 기법외 MMDH를 제안하고 사용하였다. 구조화된 조명을 이용한 계측기법은 거리지도를 얻을 수 있다는 데 유용성이 있다. 흔히 사용되는 레이저대신 주변에서 쉽게 구할 수 있는 빔 프로젝터를 사용하였으며, 실제 거리

의 계측에는 장치의 기하학적 해석을 통하여 유도된 선형의 방정식을 사용하였다. 전자식 버니어 캘리퍼스를 이용하여 제작된 기준거리 조절장치를 사용하여 간단하게 0.01[mm] 단위의 기준거리를 얻을 수 있었고, 이를 제작된 센서들의 성능 평가에 사용하였다. 초음파 센서는 약 1[mm] 정도의 오차를 보인 반면, 초점화 센서는 이보다 2배까지 큰 오차를 보였다. 그러나 두 센서가 MLE에 의하여 융합되었을 때는 각 센서 단독에 의한 측정보다 더욱 정확한 값을 얻을 수 있었다. MMDH에 의하여 초점화의 정도를 추정한 결과는 기존의 Laplacian 연산자를 사용한 경우보다 정확도는 조금 낮은 대신 속도는 훨씬 빨랐다. 빔 프로젝터를 사용한 구조화 조명 센서의 경우 제작이 간편하였고 0.3 [mm] 정도의 정확도를 얻을 수 있었으나, 빔 프로젝터에서 조사되는 광의 휘도가 크지 않다는 단점 때문에 센서의 사용은 실내의 근거리 계측에 국한될 것이다. 또 빔프로젝트의 크기가 크고, 빔과 카메라 사이의 거리가 측정의 정확성에 영향을 미치는 문제, 그리고 느린 계측속도도 설계된 시스템을 이동 로봇등에 탑재하는 것을 어렵게 하는 요인이 될 수 있다. 이밖에 제작된 센서 장치를 실제 로봇 작업등에 활용하는 연구와 제안된 세가지 상이한 측정방식을 효과적으로 통합하는 기술에 대한 연구와 실험은 중요한 향후 과제로 남아 있다. 특히 구조화된 조명센서에 의한 방식은 나머지 두 방식과 상이점이 크므로 이에 대한 고려가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

참고 문헌

- [1] M. Hebert, "Active and passive range sensing for robotics", *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 102-110, 2000.
- [2] 임영철 외, "대기 조건에 둔감한 초음파 거리측정 시스템의 설계", *센서학회지*, 제2권, 제1호, pp. 49-56, 1993.
- [3] 도용태 외, "초음파 거리 센서의 계측오차 감소를 위한 연구", *전자공학회 논문지 S*, vol. 34-S, no. 11, pp. 43-52, 1997.
- [4] J. Dias, et al., "Depth recovery using active focus in robotics", *Proc. IEEE/RSJ Int'l Workshop Intelligent Robot and System*, pp. 249-255, 1991.
- [5] J. Ens and P. Lawrence, "An investigation of meth-

- ods for determining depth from focus", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 2, pp. 97-108, 1993.
- [6] E. Hemayed and A. Farag, "Integrating edge-based stereo and structured light for robust surface reconstruction", *Proc. IEEE Int'l Conf. Intelligent Vehicle*, pp. 611-616, 1998.
- [7] J. Haverinen and J. Roning, "An obstacle detection system using a light stripe identification based method", *Proc. IEEE Joint Symposia Intelligence and Systems*, pp. 232-236, 1998.
- [8] J. Haverinen and J. Roning, "A 3-D scanner capturing range and color for the robotics applications", *Proc. Workshop Applications of 3D-Imaging and Graph-based Modeling*, pp. 41-48, 2000.
- [9] T. Henderson and E. Shilcrat, "Logical sensor systems", *J. Robotic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 169-193, 1984.
- [10] J. Pech-Pacheco, *et al.*, "Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study", *Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition*, pp. 3318-3321, 2000.
- [11] M. Subbarao and J.-K. Tyan, "Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus", *IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 8, pp. 864-870, 1998.
- [12] S. Nayar, *et al.*, "Real-time focus range sensor", Internal Report CUCS-028-94, Dept. Computer Science, Columbia University, 1994.
- [13] M. Forero-Vargas, *et al.*, "Segmentation, autofocusing and signature extraction of tuberculosis sputum images", *Proc. SPIE Conf. Photonic Devices and Algorithms for Computing IV*, pp. 341-352, 2002.
- [14] J. Neubert, *et al.*, "Automatic training of a neural net for active stereo 3D reconstruction", *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 2140-2146, 2001.
- [15] Y. Do, *et al.*, "Camera calibration where practical uncertainties exist in camera model and calibration data", *Proc. IEEE Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 491-495, 2001.
- [16] 도용태, "다중 센서의 사용에 의한 계측의 불확실성 감소 기법", *센서학회지*, vol. 4, no. 4, pp. 47-54, 1995.
- [17] E. Krotkov and R. Kories, "Adaptive control of cooperating sensors : Focus and stereo ranging with an agile camera system", *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 548-553, 1988.



문 창 수

- 2003. 2. 대구대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사)
- 2005. 2. 대구대학교 정보통신공학과 졸업 (공학석사)
- 2005. 2 ~ 현재 (주)대원GSI 기술연구소 연구원
- 주관심분야 : 계측 및 센서시스템, 마이크로프로세서 응용



도 용 태

- 1986 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1988 서강대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1992 영국 University of Hull 전자공학과 졸업 (Ph.D)
- 1989 ~ 1992 영국 University of Hull, Robotics Research Unit 연구원
- 1999 미국 Carnegie Mellon University, Robotics Institute 객원부교수
- 2000 미국 University of Wisconsin at Madison, 전기 및 컴퓨터공학과 명예연구원
- 2004 영국 Imperial College (University of London), VIP Lab 객원교수
- 1992 ~ 현재 대구대학교 전자정보공학부 교수, 한국센서학회 평생회원
- 주관심분야 : 로봇센서, 인공지능