

회전 평면경 영상의 단일 카메라 투영에 의한 거리 측정

Depth Estimation Through the Projection of Rotating Mirror Image unto Mono-camera

김형석, 송재홍, 한후석

(Hyong-Suk Kim, Jae-Hong Song, and Hu-Suk Han)

Abstract : A simple computer vision technology to measure the middle-ranged depth with a mono camera and a plain mirror is proposed. The proposed system is structured with the rotating mirror in front of the fixed mono camera. In contrast to the previous stereo vision system in which the disparity of the closer object is larger than that of the distant object, the pixel movement caused by the rotating mirror is bigger for the pixels of the distant object in the proposed system. Being inspired by such distinguished feature in the proposed system, the principle of the depth measurement based on the relation of the pixel movement and the distance of object is investigated. Also, the factors to influence the precision of the measurement are analysed. The benefits of the proposed system are low price and less chance of occlusion. The robustness for practical usage is an additional benefit of the proposed vision system.

Keywords : computer vision, mono camera, plain mirror, stereo camera, disparity, depth, rotating mirror

I. 서론

이동로봇이나 고정로봇이 자율적인 작업을 하기 위해 필요한 조건은 물체와의 정확한 거리 인식이다. 이 로봇 시스템에서의 거리 측정은 원거리 측정시에는 낮은 정밀도를 갖더라도 로봇에 근접한 물체일수록 정밀 측정해야 한다는 특징이 있다.

근거리 측정을 위한 거리 측정 시스템으로는 초음파 센서를 사용하는 방법[1][2]과 레이저를 이용하는 방법[16] 등이 있으나, 초음파 센서는 지향성이 약하고 반사에 의한 오측정이 많으며, 레이저 센서는 매우 고가이고 측정할 수 있는 면적이 매우 좁다는 등의 제한점들 때문에 로봇 작업에는 많이 사용되지 않고 있다.

넓은 범위에 대해서 한꺼번에 거리를 측정할 수 있는 시스템으로 많은 연구가 되는 방법은 스테레오 비전이다. 스테레오 비전은 인간의 시각적 거리 측정원리의 응용으로서 평행하게 설치된 두 대의 카메라를 이용하여 영상을 획득한 후, 좌우영상 위의 각 점들에 대한 정확한 영상 정합점의 위치차(disparity)를 검출하여 삼각측량 원리에 의하여 거리를 계산한다[3]-[6]. 이 스테레오 비전의 원리는 잘 정의되어 있으며 인간의 시각원리와의 유사하기 때문에 수많은 연구자들의 연구대상이 되어 왔다[3]-[8]. 그러나, 이 스테레오 비전에서 카메라들은 매우 정밀하게 설치되어야 하고, 두 카메라의 특성이 다를 경우 혹은 충격이나 경년의 변화에 의해 오차가 발생하므로[7][8] 실용화에 성공한 예는 흔하지 않다. 또한, 두 대의 카메라를 사용해야 하는 경우

는 두 세트의 영상획득장치(고속의 A/D 보드)가 필요하기 때문에 설치비용이 고가라는 취약점도 있다.

두 카메라 사이의 정렬(alignment) 문제가 없고 비용이 절감되는 방법으로는 단일 카메라를 이용하는 방법이 있다[14]-[16]. 단일 카메라를 로봇 팔이나 몸체에 부착한 후, 로봇 팔이나 몸체를 움직이면서 일정한 시간 간격에서 얻은 두 프레임의 영상에서는 스테레오 카메라 영상과 같은 화소 이격(disparity)이 나타난다[14]. 그러나, 영상간의 정렬이 어려워 거리 계산식에서 필요한 카메라간의 거리가 일정하지 않기 때문에 계산이 정확하지 않다는 문제가 있다. 이를 보완하기 위하여 단일 카메라를 따로 설치하고 반복적 수평운동을 하도록 하는 방법이 있으나, 가속과 감속을 해야하기 때문에 단위 시간에 움직인 카메라의 거리가 일정하지 않으며 카메라를 반복적으로 이동함으로써 전기장치에 충격을 줄 수 있다. 단일 카메라를 사용하는 연구의 대부분이 이 분류에 속하지만, 소수의 학자들은 단일 카메라의 영상을 두 대의 거울을 통하여 얻음으로써 스테레오 카메라의 효과를 얻는 반사굴절광학(catadioptric)이라고 하는 방법을 사용하기도 하였다[12][13]. Nayar는 두 개의 볼록 거울 앞에 단일 카메라를 설치하여 두 개 볼록 거울의 영상을 한 대의 카메라로 포착하는 스테레오 거리 측정 시스템을 만들었는데, 시계가 넓은 장점은 있지만, 볼록거울에서의 영상 왜곡 때문에 영상간의 정합 오류가 크다는 문제가 있었다[12]. 이를 극복하기 위해서 두 대의 평면경을 사용하는 방법도 사용되었지만[10][11], 시계가 좁기 때문에 실용적 이용에는 어려움이 있었다.

제안한 단일 카메라를 사용한 거리 측정 시스템은 고정된 단일 카메라 앞 일정한 거리에 정속도로 회전하는 평면경을 설치하여, 영상을 단일 평면경을 통하여 얻는 새로운 모노 비전 시스템이다. 평면경이 회전하는 동안 각 화소

접수일자 : 2001. 6. 15., 수정완료 : 2001. 8. 10.

김형석, 송재홍 : 전북대학교 전자정보공학부
(jhsong@mail.chonbuk.ac.kr)

한후석 : 기초전력공학공동연구소(han@er.snu.ac.kr)

※ 이 논문은 1997년도 기초전력공학공동연구소 연구비 지원에 의해 수행된 연구 결과입니다. 이에 감사 드립니다.

점들의 이동 속도는 평면경의 중심에서 가까운 물체일수록 느리고 멀어질수록 고속이 된다는 점에 착안하여 거리 측정시스템으로 개발하였다.

본 논문에서는 제안한 시스템에 의한 거리 측정원리를 기술하였는데, 2절에서는 제안한 거리 측정 시스템에서 화소의 이동속도가 측정거리의 함수가 됨을 유도하였고, 3절에서는 안정적 측정을 위해서 특징점의 이동벡터에 의한 측정원리를 기술하였다. 4절에서 카메라와 거울 사이의 정렬방법에 관하여 기술하였으며, 5절은 제안한 시스템의 특성 분석을 위한 시뮬레이션 및 실험이고 6절은 결론이다.

II. 회전 평면경을 통한 영상에서 물체의 거리와 화소의 이동속도

제안한 회전 평면경 영상의 투영에 의한 거리 측정 시스템은 그림 1과 같이 카메라 앞에 평면경을 설치하고 이 평면경이 회전하는 동안 카메라에 투영된 화소의 이동속도가 거울과 물체간의 거리에 따라 증가한다는 원리를 이용한 것이다.

그림 1에서 카메라 렌즈 축과 평면경이 만나는 점을 O라하고 점 O에서 물체 T까지의 거리를 R이라 하자. 이때 선분 OT와 X축이 이루는 각을 ϕ 라 하면 물체의 위치는 극 좌표로 $R \angle \phi$ 로 표현된다. 또한, 카메라 내부의 CCD 이미지 센서와 카메라 렌즈의 초점간의 거리를 f, 카메라의 초점에서 평면경의 회전중심 O까지의 거리를 d라 하자. 평면경과 X축이 이루는 각을 $-\theta$ 라 하고 물체 T가 평면경을 통하여 반사되는 위치를 T'라 하면 선분 OT'이 평면경과 이루는 각은 $\theta + \phi$ 이며 X축과는 $2\theta + \phi$ 의 각이 된다. 또, 거울 속의 물체 T'가 Z축에 투영되는 위치를 j라 하면

$$j = R \sin(2\theta + \phi) \tag{1}$$

이다. 또, T'의 X축에 대한 성분을 i라고 하면,

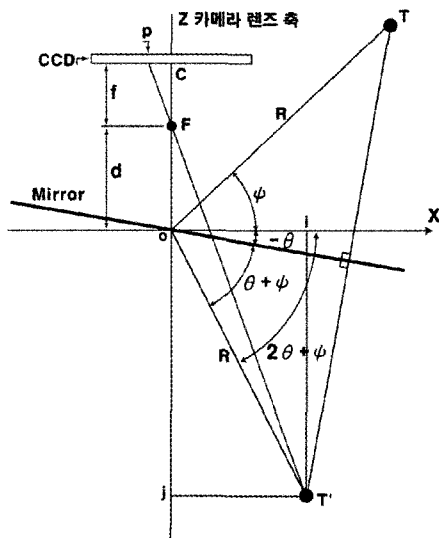


그림 1. 제안한 회전영상 투영에 의한 거리 측정 시스템.
Fig. 1. Proposed rotating mirror-based depth measurement system.

$$i = R \cos(2\theta + \phi) \tag{2}$$

가 된다.

그런데, 카메라의 pin hole 모델에서 T가 투영되어 CCD 평면에 맺히는 위치를 p라 하면, ΔFTj 와 ΔFpC 의 닮은꼴 구조에서

$$\frac{p}{f} = \frac{-R \cos(2\theta + \phi)}{d + R \sin(2\theta + \phi)} \tag{3}$$

이 된다. 여기서 음의 부호는 p의 위치가 p=0을 중심으로 T와 반대편에 있음을 의미한다.

수식을 간단히 표시하기 위해서 $\alpha = 2\theta + \phi$ 라고 하면 (3)은

$$\frac{p}{f} = \frac{-R \cos \alpha}{d + R \sin \alpha} \tag{4}$$

이고, 시간에 대해서 미분하면

$$\frac{\dot{p}}{f} = \frac{R \sin \alpha (d + R \sin \alpha) + R^2 \cos^2 \alpha}{(d + R \sin \alpha)^2} \dot{\alpha} \tag{5}$$

이다. 이를 정리하면,

$$\dot{p} = \frac{(f + \frac{fd}{R} \sin \alpha)}{(\frac{d}{R})^2 + 2(\frac{d}{R}) \sin \alpha + \sin^2 \alpha} \dot{\alpha} \tag{6}$$

이며, θ 와 ϕ 로 표시하면,

$$\dot{p} = 2 \frac{(f + \frac{fd}{R} \sin(2\theta + \phi))}{(\frac{d}{R})^2 + 2(\frac{d}{R}) \sin(2\theta + \phi) + \sin^2(2\theta + \phi)} \dot{\theta} \tag{7}$$

이다. 즉 평면경이 속도 $\dot{\theta}$ 로 회전하고 있을 때, 카메라에

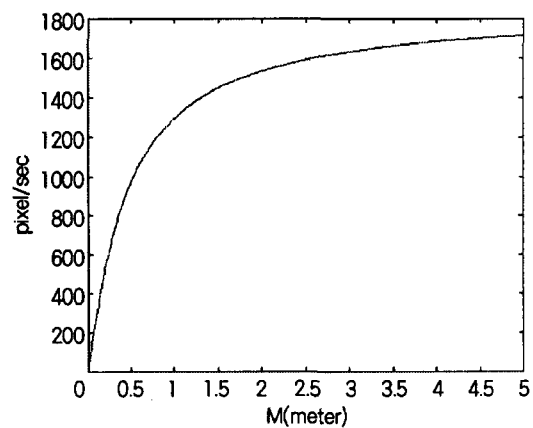


그림 2. 제안한 거리 측정 시스템에서 거리에 따른 화소의 이동속도 ($\phi = 70^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $f = 6mm$, $d = 200mm$ 및 $\dot{\theta} = \pi$ [rad/sec]).

Fig. 2. Pixel transition speed for the objects with different distance in the proposed depth measurement system ($\phi = 70^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $f = 6mm$, $d = 200mm$ 및 $\dot{\theta} = \pi$ [rad/sec]).

투영되는 화소의 속도는 (7)에서와 같이 거리 R의 함수이며 그 그래프는 그림 2와 같은데 이 함수에서 물체의 거리가 가까우면 이동속도가 작지만 거리가 멀어지면 이동속도가 커지므로, 평면경이 회전하는 동안 카메라에 포착된 화소 점의 속도가 느리면 가까운 물체이고 속도가 크면 멀리 있는 물체임을 의미한다. 이 그래프의 특성은 거리가 가까울수록 거리간의 화소 이동속도 차이가 많이 나는데 이것은 가까운 거리일수록 정밀한 거리 계산이 됨을 의미한다.

III. 영상 특징점의 이동속도에 의한 거리 측정

평면경의 중심으로부터 물체까지의 거리와 방향은 제한한 단일 카메라 구조에 의한 미분식(7)을 이용하여 구할 수 있지만, 영상점에서의 미분 값을 구하면 조명변화나 잡음 등의 영향에 의해 정확한 계산이 어렵다. 물체에 대한 거리측정 목적을 위해서는 모든 화소 점마다의 거리를 알 필요가 없고, 수는 작지만 식별성이 우수한 특징점들에서 거리를 계산하면 훨씬 신뢰성 있는 계산 값을 얻을 수 있다. 또, 영상 프레임 간의 화소 이동 속도를 계산하는 것보다, 거울이 일정한 각도만큼 움직였을 때, 이동한 화소의 거리를 측정하면 미소한 움직임에 대한 값보다 정확한 계산이 가능하다. 이 절에서는 미분을 사용하지 않고 넓은 각도로 회전할 경우(광각 회전) 특징점의 이동거리를 측정하여 물체까지의 거리를 계산하는 방법을 제안한다.

그림 1의 평면경이 그림 3과 같이 시계방향으로 회전한다고 가정할 때, 평면경과 x축이 이루는 각을 $-\theta_1$ 라 하고 더 회전하여 얻은 평면경과 x축의 각도를 $-\theta_2$ 라고 하자. $-\theta_1$ 과 $-\theta_2$ 의 위치에서 (3)과 같이 식을 얻으면,

$$\frac{p_1}{f} = \frac{-R \cos(2\theta_1 + \phi)}{d + R \sin(2\theta_1 + \phi)} \tag{8}$$

및

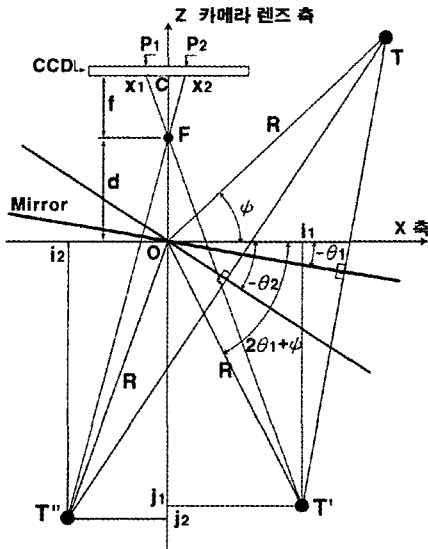


그림 3. 광각 회전에 의한 거리 측정.
Fig. 3. Distance measurement using the wide range of rotation angle.

$$\frac{p_2}{f} = \frac{-R \cos(2\theta_2 + \phi)}{d + R \sin(2\theta_2 + \phi)} \tag{9}$$

이 된다. θ_1 과 θ_2 는 거울의 회전각이므로 외부에서 측정 가능하고, d는 카메라초점에서 거울까지의 거리, p_1 과 p_2 는 영상에서 측정하는 값이므로 R과 ϕ 만이 미지수가 된다. (8)과 (9)를 R에 대하여 정리하면

$$R = \frac{-p_1 d}{f \cos 2\theta_1 \cos \phi - \sin 2\theta_1 \sin \phi + p_1 (\sin 2\theta_1 \cos \phi + \cos 2\theta_1 \sin \phi)} \tag{10}$$

및

$$R = \frac{-p_2 d}{f (\cos 2\theta_2 \cos \phi - \sin 2\theta_2 \sin \phi) + p_2 (\sin 2\theta_2 \cos \phi + \cos 2\theta_2 \sin \phi)} \tag{11}$$

이 된다. (10)과 (11)을 이용하면,

$$\begin{aligned} & (p_2 f \cos 2\theta_1 + p_2 p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 f \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2) \cos \phi \\ & = (p_2 f \sin 2\theta_1 - p_2 p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 f \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2) \sin \phi \end{aligned} \tag{12}$$

관계식을 얻을 수 있으므로

$$\frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \frac{fp_2 \cos 2\theta_1 + p_1 p_2 \sin 2\theta_1 - fp_1 \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2}{-fp_2 \sin 2\theta_1 - p_1 p_2 \cos 2\theta_1 - fp_1 \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2} \tag{13}$$

혹은

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{fp_2 \cos 2\theta_1 + p_1 p_2 \sin 2\theta_1 - fp_1 \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2}{-fp_2 \sin 2\theta_1 - p_1 p_2 \cos 2\theta_1 - fp_1 \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2} \right] \tag{14}$$

가 된다. 따라서, 회전하는 평면경이 X축과의 사이에 θ_1 및 θ_2 의 각도를 이루고 있을 때, 임의의 물체가 카메라에 투영되는 영상점 p_1 과 p_2 를 측정한다면, X 축과 물체의 각도 ϕ 를 (14)에 의해 계산할 수 있으며, 이 ϕ 를 (10) 혹은 (11)에 대입하면 평면경의 중심점으로부터 물체까지의 거리 R을 계산할 수 있다.

IV. 카메라 파라미터 캘리브레이션

제안한 시스템에서 관여되는 카메라 파라미터는 (11)-(14)에서와 같이 CCD 셀 간의 간격과 초점거리이다. 여기서 f는 스펙에서 주어진 값으로서 실제와는 다를 수 있으며, p_1 및 p_2 도 CCD 중앙으로부터의 실제 거리로서 CCD 셀 간격을 정확히 알아야만 환산할 수 있는 값이다. 그런데, a_1 및 a_2 를 각각 p_1 및 p_2 에 대한 화소수로 환산된 값이라 하고, 화소 간격을 δ 라 하면

$$p_1 = \delta a_1 \tag{15}$$

$$p_2 = \delta a_2$$

의 관계식을 얻을 수 있다. 이 값을 (10) 대입하고 분자 분

모를 δ 로 나누면,

$$R = \frac{-q_1 d}{g(\cos 2\theta_1 \cos \psi - \sin 2\theta_1 \sin \psi) + q_1(\sin 2\theta_1 \cos \psi + \cos 2\theta_1 \sin \psi)} \quad (16)$$

를 얻는다. 여기서 g 는 $\frac{f}{\delta}$ 로 정의된 상수이며 초점 거리가 화소 간격의 수로 표현된 값으로서 부정확성이 개입 될 소지가 있는 초점 거리 및 화소간격 δ 가 모두 관련된 상수이다.

또, 방향 계산 (14)에서도 (15)의 관계를 대입하면

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{gq_2 \cos 2\theta_1 + q_1 q_2 \sin 2\theta_1 - gq_1 \cos 2\theta_2 - q_1 q_2 \sin 2\theta_2}{-gq_2 \sin 2\theta_1 - q_1 q_2 \cos 2\theta_1 - gq_1 \sin 2\theta_2 + q_1 q_2 \cos 2\theta_2} \right] \quad (17)$$

로서 q_1 , q_2 및 g 의 함수로 표현된다. (16) 및 (17)에서 알 수 있는 바와 같이 R 및 ψ 값 결정을 위해서 한 개의 부정확한 상수 g 만을 캘리브레이션을 통하여 구하면 된다. 이를 위해서 이미 알고있는 임의의 위치 점에 대한 R , ψ 및 이 위치점이 영상에 나타나는 화소 위치 q_1 및 q_2 를 (16)에 대입함으로써 실제 카메라의 특성에 적합한 g 값을 구한다.

V. 실험 및 고찰

제안한 단일 카메라에 의한 거리 측정시스템의 특성을 파악하기 위해서 시뮬레이션과 실측실험을 수행하였다. 이 실험을 위한 카메라의 정렬을 위해서 그림 3과 같이 카메라의 정면에 설치된 평면경이 회전하는 동안, 카메라에 포착된 화소점들이 영상의 수평축과 평행하게 이동하도록 카메라와 평면경의 회전축을 정렬하였다. 또한, 이론적 수식 (16) 및 (17)의 값이 실제의 측정값과 일치하도록 하기 위해서 이 식들에서의 유일한 불확실 요소인 파라미터 g 를 이미 알고 있는 위치점을 이용하여 결정하였다. 이렇게 얻은 화소 간격 수로 표현한 g 값은 440pixel이었다.

1. 제안한 거리 측정시스템의 특성 시뮬레이션

제안한 거리 측정 장치를 사용하여 (16) 및 (17)에 의해 물체의 위치를 계산하기 위해서는 평면경이 회전하기 이전의 화소 위치 q_1 과 평면경이 회전하여 이동한 화소 위치 q_2 를 알아야 한다. 이를 위해서 사용할 수 있는 방법은 영상의 특징점 간의 정합인데, 영상간의 정합에는 항상 오정합이 있을 수 있다. 한 화소의 오정합의 발생할 경우 이로 인한 거리 측정오류는 측정거리의 정밀도를 결정하는 중요한 요소이므로 이를 조사하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션은 (10)과 (13)을 기반으로 하여 거리 R 과 방향 ψ 를 계산하였으며 q_2 에 정합되어야 할 화소점이 q_2+1 인 위치에 정합 되었을 때의 오차를 계산하였다.

그림 4는 $q_1=0$ 에서 시작하여 15화소씩 증가시키고 각 q_1 에 대해서 q_2 는 5화소씩 증가시키면서 1화소 정합오류를 그림으로 표시하였다. 결과적으로 그림 4에서 실선은 각 위치의 물체가 1화소 정합오류가 발생했을 경우, 거리와 방향의 오차를 나타낸다. 그림에서 실선의 방향이 거의

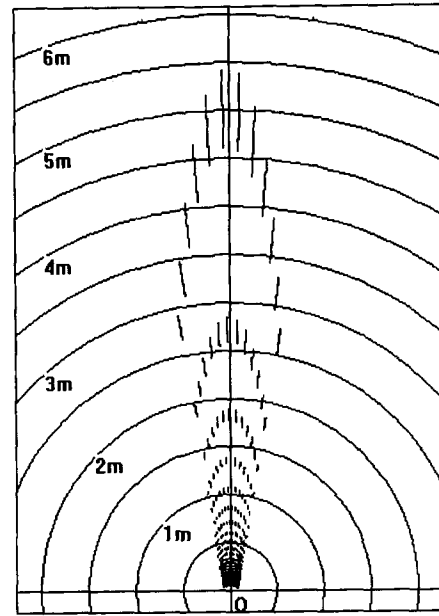


그림 4. 1 화소 오정합에 대한 거리 및 방향 측정오차.
Fig. 4. Distance and direction error caused by the mismatching of 1 pixel.

방사상으로 나타나 있음은 1화소 정합오류에 대해서 방향 오차의 크기는 매우 작다는 것을 의미하며 실선의 길이는 거리 오차를 의미하는 것으로서 거리가 멀어질수록 오차의 크기가 커짐을 알 수 있다. 그래프가 원점에 접근할수록 매우 촘촘해 지고 거리도 짧아지는 것은 근 거리의 물체에 대해서는 1화소의 정합 오류가 거리 계산에 매우 작은 영향을 준다는 것과 동시에 측정거리 정밀도가 크다는 것을 의미한다.

그림 5는 1화소 오정합에 대한 거리 계산 오차가 각 거리에서 얼마나 발생하는지를 정량적으로 보이기 위한 그래프로서 $\psi=70^\circ$ 방향의 물체들에 대하여 1화소 오정합이 발생할 경우의 거리오차를 각각의 거리로 나누어 오차율을 그린 것이다. 그래프에서 근거리일수록 정밀한 측정이 가능하며 원거리가 될수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 그림 6은 1화소 정합오류가 발생할 때의 거리에 따른 방향

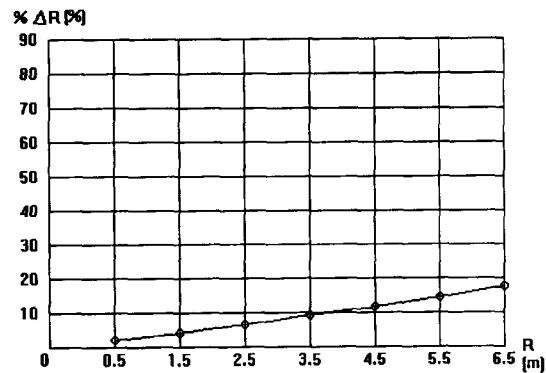


그림 5. 그림 4에서 $\psi=70^\circ$ 방향의 각 거리에서의 거리 오차율.
Fig. 5. Error rate of depth measurement for different distances at $\psi=70^\circ$ direction.

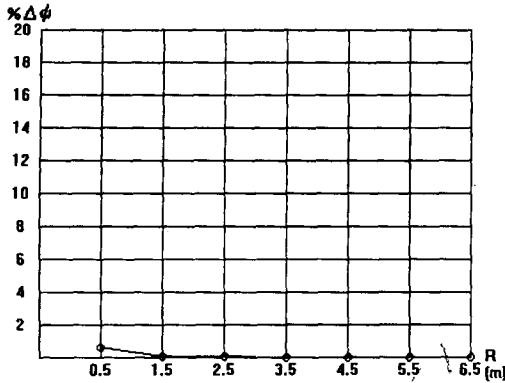


그림 6. 그림 4에서 $\phi=70^\circ$ 방향의 각 거리에서 방향 오차율.
Fig. 6. Error rate of direction measurement for different distances at $\phi=70^\circ$ direction.

계산 오류율인데, 최대 0.7%정도의 미소한 오차가 발생하며 그것도 근거리에서만 발생하므로 화소값 오정합에 의해 발생하는 각도 계산오류는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

위의 특성 분석은 평면경이 14° 회전할 때의 결과이다. 평면경의 회전각 범위가 달라질 때 나타나는 효과를 분석하기 위하여 거울의 회전각이 위 실험보다 더 좁은 6° 및 더 넓은 20°에서 같은 실험을 수행하였다. 그림 7(a)는 평면경이 6° 회전할 경우로서, 측정 범위는 넓지만 원거리에서 화소 오정합에 대한 오차가 심해짐을 알 수 있다. 회전 범위를 크게 하여 20°가 되는 경우의 결과는 그림 7(b)로서 측정 정밀도는 증가하지만, 시계가 매우 축소된다.

이 측정 시스템은 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 거리 측정의 시계가 제한되어 있지만, 회전하는 평면경을 사용하기 때문에 소프트웨어 적으로 측정 방향을 임의로 설정할 수 있으므로 결국 모든 방향에 대해서 거리를 측정을 할 수 있게 된다. 평면경이 회전하여 측정 방향이 변경될 때, 측정 오차가 변할 가능성에 대해서 확인하기 위해 다양한 방향에서 오차 확인 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8은 그 중 측정 방향이 -180°, 90° 및 0°일 때의 오

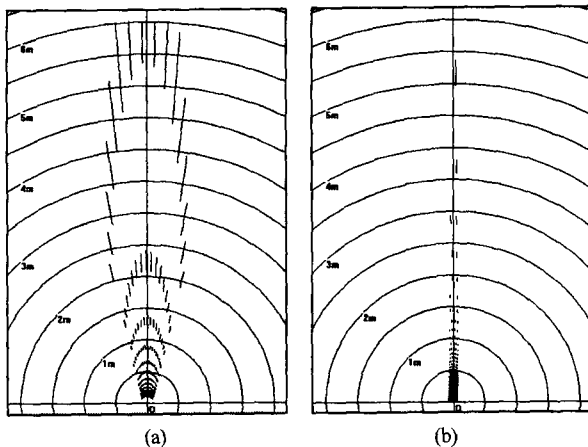


그림 7. 다른 회전각에 대한 측정 오차 (a) 6° 회전 (b) 20° 회전.
Fig. 7. Measurement error for different rotation angles (a) 6° rotation (b) 20° rotation.

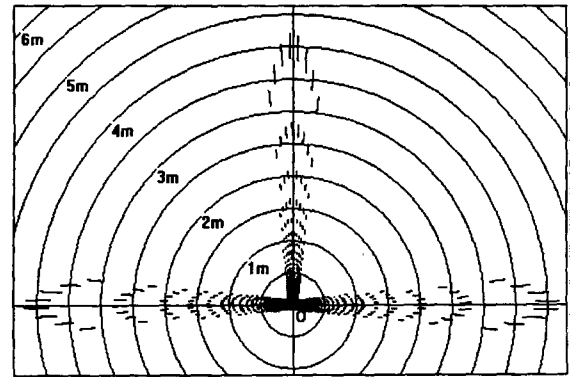


그림 8. 3가지의 다른 방향에서 계산한 1화소 오정합에 대한 거리 및 방향 측정오차.
Fig. 8. Distance and direction error caused by the mismatching of 1 pixel for 3 different directions.

차를 도시한 것으로서 평면경이 임의의 각도로 회전하여도 측정 오차에는 변화가 없음을 보여주고 있다.

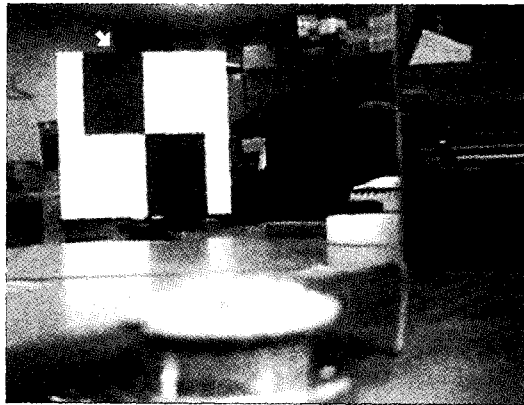
2. 제안한 시스템에 의한 거리 계측 실험

2.1 거리에 따른 화소의 이동거리 계측

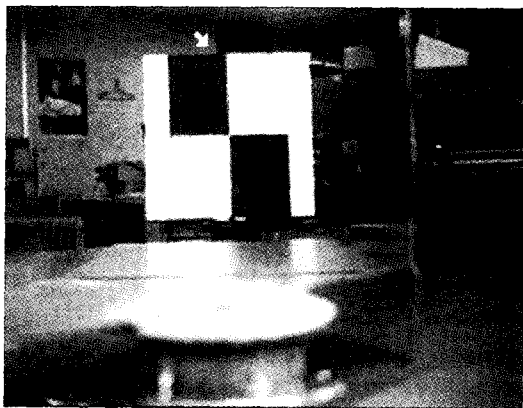
이 실험은 평면경의 회전 장치 앞에 카메라를 설치하여 평면경을 일정한 각도만큼 회전시켰을 때 이동되는 화소의 수가 물체와의 거리에 따라 어떻게 변하는지 실제 측정을 통하여 확인하였다. 이 실험에서 사용한 카메라는 화소의 수가 320×240이고 초점 거리 6mm이며 평면경은 가로 및 세로 방향의 길이가 각각 110mm 및 60mm인 소형이다. 또한, 카메라와 평면경 사이의 거리는 200mm가 되도록 시스템을 구성하였다. 카메라 켈리브레이션 수행결과 얻어진 g값은 440pixel이었다.

그림 9(a)에서 사각 격자 무늬를 가진 판을 중심으로 한 영상은 평면경을 통해서 고정 카메라에 의해 얻어지는 영상으로서 회전하기 이전의 영상이고 그림 9(b)는 평면경이 5°만큼 시계방향으로 회전했을 때 얻어지는 영상의 예이다. 그림에서 보는 바와 같이 평면경이 회전함에 따라 그림 9(a)의 사각판이 그림 9(b)에서는 우측으로 이동해 있음을 확인할 수 있다. 여기서 주목할 점은 그림 9(a)의 사각판 중앙의 뒤에 보이는 세로 기둥 모양을 (// 표시물체) 관찰하면 그림 9(b)에서는 사각 무늬 판의 중앙선 보다 우측으로 더 이동되어 있음을 보여주고 있다. 이것은 평면경이 회전할 때, 화소의 이동은 거리가 먼 물체의 것일수록 많아짐을 보여주는 예이다.

화소의 변위는 거리에 따라 큰 변화가 있어야 거리에 대한 식별력이 좋기 때문에 카메라와 평면경의 거리 및 평면경의 각도를 다양하게 설정하여 일정한 각도 변화에 대한 변위를 측정하였다. 그림 10의 그래프는 카메라와 평면경 사이의 거리가 각각 10cm, 20cm, 및 30cm인 경우에 대하여 평면경을 렌즈 축과 90° 및 +45°로 설정하여 거리에 따른 화소의 변위 정도를 측정하였다. 모든 그래프들에서 거리가 멀어질수록 일관되게 화소의 변위가 커짐을 알 수 있는데, 이것은 기존의 스테레오 카메라나 단일 카메라 시스템에서 화소의 이격거리(disparity)는 거리가 멀어질수록 작다는 것과 반대의 특징이다. 따라서 기존의 시스템에서



(a)



(b)

그림 9. 회전하는 평면경을 통해서 얻은 카메라 영상의 예 (a) 회전 이전 (b) 5° 시계방향 회전 후.

Fig. 9. An example of images acquired through the rotating mirror (a) before rotation (b) after rotation.

는 많이 이동한 근거리의 물체가 원거리 물체를 가려서 원거리 물체가 보이지 않게 되는 폐색(occlusion) 문제가 발생하지만 제안한 시스템에서는 이런 문제가 없다는 장점도 있다.

그림 10의 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안

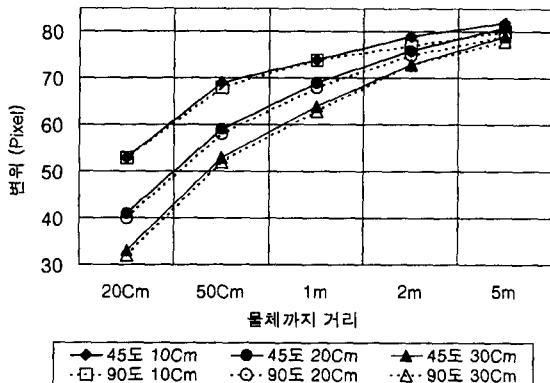


그림 10. 거리에 따른 화소의 변위(카메라와 평면경간의 거리와 회전 각도가 다른 경우).

Fig. 10. Pixel transition rate at different distances with the different distance between the camera and the mirror and with the different rotation angles.

한 시스템의 특징은 평면경의 렌즈 축과의 각도에는 거의 차이가 없었으나, 카메라와 평면경간의 거리가 멀면 멀수록 화소의 변위 범위가 커짐을 알 수 있다. 이것은 카메라와 평면경간의 거리가 커질수록 정밀한 측정이 가능함을 의미하지만, 이에 따라 평면경의 크기도 커져야 하기 때문에 실험에서는 카메라와 평면경간의 거리는 20cm로 설정하였다. 실험 결과에서 근거리에서의 변위 변화가 원거리에서 보다 크다는 것은 근거리의 식별성이 더 크다는 것을 의미한다.

2.2 거리 측정오차의 비교

본 실험에서는 제안한 측정시스템을 구성하여 실제거리 측정실험을 수행하였으며 실제의 거리와 비교하였다. 이를 위해서 평면경이 회전하기 전에 촬영한 영상으로부터 각각 임의의 특징점 이동 위치를 측정하고 (10) 및 (13)을 이용하여 거리 및 방향을 계산한 다음, 각 특징점이 존재하는 공간상의 실제 물체 위치와 비교하였다. 그림 11은 $\psi = 80^\circ$ 방향에 위치한 물체들에 대해서 계산한 거리와 실측에 의한 거리와의 비교인데 직선이 실제 거리이고 곡선이

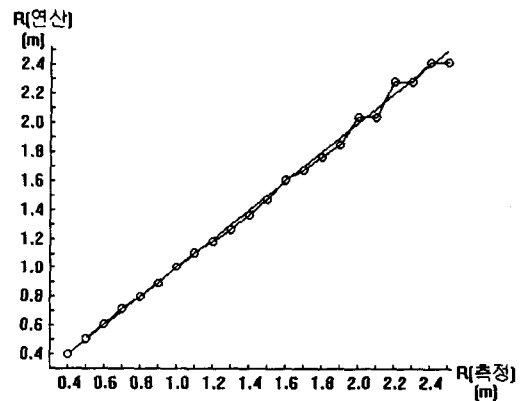


그림 11. 거리 측정치 비교. 직선은 실제거리이고 곡선은 제안한 시스템에 의한 측정치.

Fig. 11. Comparison of measured distances. The straight line is the real distance and the curved line is the measurement by the proposed system.

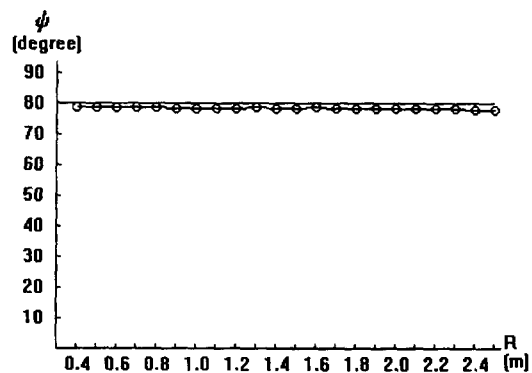


그림 12. 각도 측정치 비교. 직선은 실제각도이고 굽은 선은 제안한 시스템에 의한 측정치.

Fig. 12. Comparison of measured angles. The straight line is the real angle and the curved line is the measurement by the proposed system.

본 시스템에 의한 계측 결과이다. 그림에서 확인하는 바와 같이 본 시스템에 의한 계측은 근거리에서는 실제 값에 매우 근접했으며 거리가 멀어질수록 차이가 다소 커지는 경향이 있지만 2.5m에서 오차가 10cm 이내의 정확성이 있음을 확인할 수 있다. 여기서 측정값을 2.5m로 제한한 이유는 사용한 거울의 크기가 작기 때문에 거리가 더 멀어질 경우 영상이 화면을 벗어나기 때문이었으나 거울의 크기를 조금 더 크게 하면 5m 이내의 근거리 측정에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 그림 12는 그림 11의 측정 실험시의 각도 오차인데, 실제의 각도와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

이 실험 결과로 이 시스템에 의한 근거리 측정오차는 실제 값과 크게 다르지 않으며 약간의 오차도 카메라의 내부 파라미터의 부정확성에 의한 것으로 생각되며, 정밀한 캘리브레이션을 수행하면 보다 정확한 측정이 가능할 것이다.

VI. 결론

제안한 거리측정 시스템은 고정된 단일 카메라 앞에 회전하는 평면경을 설치하여, 카메라의 영상을 평면경을 통하여 얻는 구조이다. 이 구조에서는 평면경이 회전하면 카메라에 투영되는 화소 점들의 이동 속도가 가까운 물체일수록 느리고 멀어질수록 고속이 된다는 점에 착안하여 이동 속도와 거리간의 관계를 규명하였다. 제안한 시스템에서는 이 특징으로 인하여 멀리 있는 물체가 가까운 물체에 의해서 가려지는 폐색(occlusion) 발생이 적다는 장점이 있다.

제안한 거리 측정 시스템의 특성을 파악하기 위하여 시뮬레이션과 실제 측정 실험을 병행하였다. 시뮬레이션에서는 측정의 정밀도를 한 화소의 부정확한 정합이 발생할 때, 발생하는 거리 측정오차로 표현하였는데, 물체가 근거리일수록, 평면경과 각도가 작을수록 측정의 정밀도가 커짐을 알 수 있었다. 또, 카메라와 평면경간의 거리가 멀수록 원거리에서도 거리 측정의 정밀도가 증가함을 확인하였다. 실제 실험결과에서는 카메라와 평면경간의 거리가 20cm일 때, 2.5m 거리의 물체에 대한 1화소 거리오차가 약 10cm 이하의 정밀도를 보였다. 이 시스템에서는 거리가 멀수록 정밀도가 감소하는 특징이 있지만, 약 5m 이내의 물체에 대한 거리 측정장치로서 활용할 수 있으므로 로봇의 자율작업에 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다.

본 시스템은 단일 카메라를 사용하므로 카메라간의 정치가 필요가 없으며, 기존 스테레오 비전에서 발생하는 폐색 문제가 없고 평면경이 회전하는 구조이므로 안정적인 뿐 아니라 카메라에 대한 영상 획득장치도 한 세트만 필요하여 경제적이라는 장점이 있다.

참고문헌

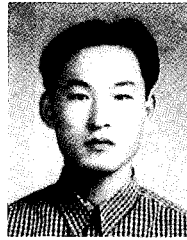
- [1] W. T. Kuang and A. S. Morris, "Ultrasonic doppler distance measurement technique for robot tracking system," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 11, IEE 27, pp. 942-3, May 1999.
- [2] D. Marioli and C. Narduzzi, "Digital time of flight measurement for ultrasonic sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, no. 1, pp. 93-97, 1992.
- [3] S. T. Barnard and M. A. Fischler, "Computational stereo," *ACM Computing Surveys*, vol. 14, no. 4, pp. 553-572, 1982.
- [4] Y. Yakimovsky & R. Cunningham, "A System for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 7, pp. 195-210, 1978
- [5] W. Eric L. Grimson, "Computational Experiments with a feature Based stereo algorithm," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-7, no. 1, pp. 17-33, Jan., 1985.
- [6] U. R. Dhond and J. K. Aggarwal, "Structure from stereo-a review," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 19, pp. 1489-1510, Nov./Dec. 1989.
- [7] P. Puget and T. Skordas, "An optimal solution for mobile camera calibration," *Proc. IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 19(6), pp. 1426-1445 (November/December 1988).
- [8] Z. Zhang and O. D. Faugeras, "Calibration of a mobile robot with application to visual navigation," *Proc. IEEE Work. Visual Motion*, Irvin, California, pp. 306-313, March, 1989.
- [9] W. Choi, C. Ryu, and H. Kim, "Navigation of mobile robot using mono-visio and mono-audition," *IEEE Computer*, vol. 22, no. 6, pp. 46-57, 1989.
- [10] A. Goshtasby and W. Gruver, "Design of a single-lens stereo camera system," *Pattern Recognition*, vol. 26, no. 6, pp. 923-937, 1993.
- [11] M. Inaba, T. Hara, and H. Inoue, "A stereo viewer based on a single camera with view-control mechanism," *Proceedings of the international Conference on Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1857-1865, July, 1993.
- [12] S. K. Nayar, "Sphereo: Determining depth using a single camera and two specular spheres," *Proceedings of SPIE: optics, illumination, and image sensing for machine vision II*, pp. 245-254. Nov., 1988.
- [13] S. Nene and S. Nayar, "Stereo with mirrors," *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 1087-1094, Jan., 1998.
- [14] Y. Liu and T. Huang, "A linear algorithm for motion estimation using straight line correspondences," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 44, pp. 35-57, 1988.
- [15] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method," *International Journal of Computer Vision*, vol. 9, no. 2, pp. 137-154, 1992.
- [16] H. Zhuang, R. Sudhakar, and J. Shieh, "Depth estimation from a sequence of monocular images with known camera motion," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 13, pp. 87-95, 1994. 18th Digital Avionics Systems Conference.
- [17] M. -C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 1, SPIE, pp. 10-19, Jan., 2001.



김형석

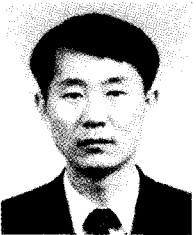
1956년 1월 21일 생. 1980년 한양대 전자공학과 졸업. 1982년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Dept. of Electrical and Computer Eng., University of Missouri, Columbia (Ph.D.). 1982년~1993년 국방과학 연

구소 선임연구원. 현재 전북대 전자정보공학부 교수. 관심분야는 신경회로망 모델 개발, VLSI에 의한 신경회로망 하드웨어 구현, 로봇비전 및 무인헬기 원격제어.



송재홍

1973년 12월 13일 생. 1999년 전북대 제어계측공학과 졸업. 현재 동대학원 석사과정.



한후석

1958년 10월 24일생. 1987년 전북대 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 의용 생체 공학과 박사. 현재 기초전력연구소 선임연구원.