

회전 평면경과 단일 카메라를 이용한 거리측정 시스템의 정밀도 분석

論 文

52D-11-2

Precision Analysis of the Depth Measurement System Using a Single Camera with a Rotating Mirror

金 炯 奭* · 羅相益** · 韓后錫*** · Chun-Shin Lin[§]

(Hyong-Suk Kim · Sangik Na · Hu-Suk Han · Chun-Shin Lin)

Abstract : Theoretical analysis of the depth measurement system with the use of a single camera and a rotating mirror has been done. A camera in front of a rotating mirror acquires a sequence of reflected images, from which depth information is extracted. For an object point at a longer distance, the corresponding pixel in the sequence of images moves at a higher speed. Depth measurement based on such pixel movement is investigated. Since the mirror rotates along an axis that is in parallel with the vertical axis of the image plane, the image of an object will only move horizontally. This eases the task of finding corresponding image points. In this paper, the principle of the depth measurement-based on the relation of the pixel movement speed and the depth of objects have been investigated. Also, necessary mathematics to implement the technique is derived and presented. The factors affecting the measurement precision have been studied. Analysis shows that the measurement error increases with the increase of depth. The rotational angle of the mirror between two image-takings also affects the measurement precision. Experimental results using the real camera-mirror setup are reported.

Keywords : theoretical analysis, mono camera, plain mirror, disparity, depth, rotating mirror.

1. 서 론

이동로봇이 자율작업을 자유롭게 수행하기 위해서는 작업장 내부에 존재하는 장애물들의 위치 파악이 선행되어야 하며, 파악된 정보를 이용하여 로봇 스스로 장애물에 대처하기 위해서는 장애물과 로봇과의 거리를 인식할 수 있어야한다. 이러한 로봇 시스템의 거리측정을 위해서 가장 보편적으로 사용될 수 있는 방법은 인간 눈의 거리측정 원리를 모방한 스테레오 비전 기술이다. 스테레오 비전은 평행하게 설치된 두 대의 카메라 영상에 투영된 동일한 물체의 공간적 불일치를 이용하여 거리를 측정하는 시스템으로, 좌우 영상내의 각 픽셀에 대한 정확한 영상 정합점의 위치 차를 검출하여 삼각측량의 원리에 의해 3차원 거리 정보를 계산한다 [1-4]. 이러한 스테레오 비전은 측정오차를 최소화하기 위해 동일한 특성을 갖는 두 대의 카메라를 수평선상에 정확하게 정렬해야 하며, 정밀한 캘리브레이션을 필요로 한다. 만일 제조과정이 다르거나, 충격, 경년에 의해서 두 대의 카메라의 특성이 일치하지 않는다면 에러율이 크다는 단점이 있다 [5][6]. 이 스테레오 비전 시스템의 단점을 극복하기 위해서 단일 카메라를 이용한 거리측정 시스템이 개발되었다 [7-9]. 그 중 하나가 로봇 아이 핸드 시스템(Robotic

eye-in-hand system)인데, 움직일 수 있는 로봇의 팔에 카메라를 부착하여 로봇의 팔이 카메라를 이동시켜 얻은 두 장의 영상을 이용하여 거리정보를 추출하는 기술이다. 그러나 로봇 팔의 위치 변화가 고정되지 않고 여러 방향으로 이동하므로 이미지 상의 정합점을 찾는 데 계산이 복잡하다는 점과, 로봇 팔의 이동으로 인해서 카메라에 잦은 충격을 주기 때문에 카메라가 파손되기 쉬우며, 로봇 팔의 물리적인 이동을 필요로 하기 때문에 거리정보를 추출하는데 시간 지연이 발생하는 문제점들이 있다. 단일 카메라를 이용한 또 다른 시스템으로는 단일 카메라와 고정된 두 개의 거울을 이용하여 거리정보를 추출하는 시스템이 있다 [10-12]. 이 시스템은 두 개의 거울로부터 반사되는 스테레오 영상들을 단일 카메라를 통해 획득하여 거리를 계산한다. 그러나 두 거울 사이에 중복되는 영역을 이용하여 거리측정을 하므로, 중복되는 부분이 적어 시계가 좁다는 단점이 있다. 중복되어지는 영역을 넓히기 위해 평면 거울을 볼록거울로 대체하는 방법이 있으나 볼록거울로 인한 영상의 왜곡이 있기 때문에 영상간의 정합 오류가 크다는 문제가 있다[12][13].

이 문제점을 해결하기 위해서 단일 카메라 시스템은 평면경이 회전하는 동안 반사되는 연속적인 영상 프레임들을 카메라를 통해 얻은 후, 영상 특징점들의 이동속도를 이용하여 거리정보를 추출하는 시스템이 제안된 바 있다 [14]. 이 시스템은 연속적인 영상에서 먼 거리에 위치한 물체의 특징점 일수록 빠르게 이동하는 원리를 이용하여 거리를 측정한다. 이 시스템은 평면경이 수평축에 수직인 축을 중심으로 회전하는 동안 평면경에 반사된 영상을 단일 카메라를 통하여 획득하기 때문에, 획득된 영상내의 모든 특징점들은 동일한 수평선상에 놓이므로 정합 오류를 줄일 수 있다. 또한 평면

* 正 會 員 : 全 北 大 工 大 電 子 情 報 工 學 部 副 教 授 · 工 博

** 準 會 員 : 全 北 大 工 大 制 御 計 測 工 學 科 碩 士 課 程

*** 正 會 員 : 全 北 大 工 大 醫 用 生 體 工 學 科 工 博

§ 正 會 員 : University of Missouri-Columbia 電 氣 工 學 科
副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2003 年 5 月 9 日

最 終 完 了 : 2003 年 9 月 16 日

경이 회전하는 동안 한 쌍 이상의 영상을 사용할 수 있기 때문에 쉽게 정합점을 찾을 수 있으며, 여러 쌍의 영상을 이용하여 얻은 결과의 평균을 이용할 수 있으므로 신뢰성 있는 거리측정이 가능하다. 평면경의 방향전환이 자유롭기 때문에 측정방향에 유연성을 갖는다는 점도 이 시스템의 장점이다. 그러나, 이 회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템에 대해서는 측정장치의 가장 중요한 요소라고 할 수 있는 정밀도 분석이 아직 되어 있지 않은 상태이다. 본 논문에서는 회전 평면경과 단일 카메라 시스템을 이용한 거리측정 시스템의 정밀도에 영향을 주는 요인들을 이론적으로 분석하고 측정 오차가 최소화 될 수 있는 기준을 제시한다.

이를 위해서, 2절에서는 회전 평면경과 단일카메라 시스템에 의한 거리측정원리를 설명하였고, 3절에서는 본 시스템의 카메라 캘리브레이션에 대해 기술하였으며 4절에서는 거리측정 시스템의 측정 오차 민감도 분석 및 측정 오차 최소화 방안에 대해 기술하였다. 5절에서는 실험결과를 기술하였고, 6절은 결론이다.

2. 회전 평면경과 단일 카메라에서의 거리 계산

회전 평면경과 단일 카메라에 의한 거리측정 시스템은 그림 1과 같이 거울이 회전하는 동안 거울에 반사된 영상이 거울 앞에 설치된 단일 카메라에 의해 획득되는 구조를 갖는데, 이 시스템에서 단일 카메라 영상 내의 물체들은 평면경 회전축으로부터 먼 물체일수록 빠르게 이동하며 가까운 물체일수록 천천히 이동한다는 원리를 이용한 것이다. 그림 1에서 카메라 렌즈 축과 평면경이 만나는 점을 O 라하고 점 O 에서 물체 T 까지의 거리를 R 이라 하자. 이 때 선분 OT 와 X 축이 이루는 각을 ϕ 라 하면 물체의 위치 T 는 극좌표 R, ϕ 로 표현된다. 또한 CCD 센서에서 카메라의 초점 F 까지의 거리를 f , 카메라 초점 F 에서 원점 O 까지의 거리를 d , 평면경과 X 축이 이루는 각을 θ 라하고 물체 T 가 평면경을 통하여 반사되는 위치를 T' 라 하면 선분 OT' 이 평면경과 이루는 각은 $\theta + \phi$ 이며 X 축과 이루는 각은 $2\theta + \phi$ 이 된다. $2\theta + \phi$ 은 투영된 물체의 각이라 부르며, 시계 방향으로 회전하는 거울 각은 $-\theta$ 라 할 수 있다.

2.1 거리 계산의 원리

그림 1의 시스템에서 물체의 거리는 평면경이 회전하는 동안 획득된 두 장의 영상을 이용하여 측정할 수 있다. 평면경이 시계 방향으로 회전하여 X 축과 θ_1 과 θ_2 의 각을 이루는 두 장의 영상을 획득한다고 가정하자. 이때 CCD 센서에 맺히는 점을 각각 p_1, p_2 라 하면, 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{p_1}{f} = \frac{-R \cos(2\theta_1 + \phi)}{d + R \sin(2\theta_1 + \phi)} \tag{1}$$

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

여기에서 d 와 f 는 알고있는 상수값이고, 평면경의 회전각

θ_1 과 θ_2 는 측정 가능한 값이다. 또한, p_1 과 p_2 는 획득된 두 장의 영상내의 위치를 계산함으로써 구할 수 있는 값이므로, 이 값을 식 (1)과 식 (2)에 대입하면 미지수인 R 과 ϕ 를 계산할 수 있다. 식 (1)과 식 (2)를 거리 R 에 대하여 정리하면

$$R = \frac{-p_1 d}{f \cos(2\theta_1 + \phi) + p_1 \sin(2\theta_1 + \phi)} \tag{3}$$

및

$$R = \frac{-p_2 d}{f \cos(2\theta_2 + \phi) + p_2 \sin(2\theta_2 + \phi)} \tag{4}$$

이 된다.

위의 식 (3)과 식 (4)에서 R 을 제거하고 \sin 과 \cos 의 형태로 변환하면

$$\begin{aligned} & (p_2 f \cos 2\theta_1 + p_2 p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 f \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2) \cos \phi \\ &= (p_2 f \sin 2\theta_1 - p_2 p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 f \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2) \sin \phi \end{aligned} \tag{5}$$

가 된다. 식 (5)를 정리하면

$$\frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \frac{p_2 f \cos 2\theta_1 + p_2 p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 f \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2}{p_2 f \sin 2\theta_1 - p_2 p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 f \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2} \tag{6}$$

또는

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{p_2 f \cos 2\theta_1 + p_2 p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 f \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2}{p_2 f \sin 2\theta_1 - p_2 p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 f \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2} \right] \tag{7}$$

이 된다.

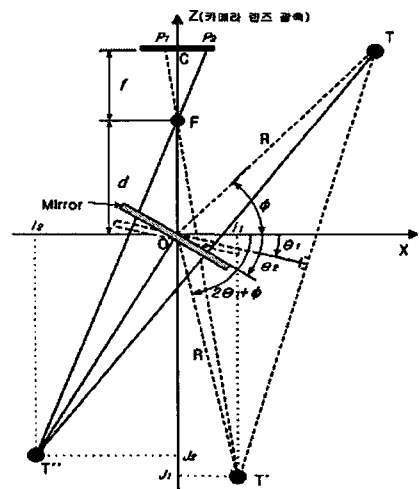


그림 1 회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템의 원리

Fig. 1 Principle of the depth measurement system with rotating mirror and mono camera.

따라서 이 시스템을 이용하여 거리를 측정하는 방법은 임의의 물체가 카메라에 투영되는 영상점 p_1, p_2 을 식 (7)에 대입하여 ϕ 을 구한 후, ϕ 을 식 (4)에 대입하여 실제거리 R 을 측정하거나, 식 (2)를 미분하여 얻은 픽셀의 이동속도에 관한 방정식을 이용하여 거리를 측정하는 두 가지 방법이 있다. 평면경이 X 축과 Z 축이 이루는 평면에 수직하게 설치되어 있고, 이 수직축을 중심으로 회전하기 때문에 평면경이 회전하기 전의 픽셀 p_1 과 평면경이 회전한 후의 위치 p_2 는 동일한 수평선상에 놓여지게 된다. 그러므로 p_1 에 대응하는 정합점 p_2 는 동일한 수평선상에서 쉽게 찾을 수 있다.

2.2 측정 원리의 기하학적 해석

그림 2는 거리측정 시스템의 기하학적 원리를 설명한 그림이다. 그림 2에서 M_1 과 M_2 는 평면경이 각각 θ_1 과 θ_2 만큼 회전한 거울의 위치를 나타낸다. 물체 T_1 이 M_1 과 M_2 의 위치에 놓인 거울에 반사되어 각각 CCD 센서의 점 p_1, p_2 의 위치에 투영될 때 물체가 평면경에 입사하는 입사각을 각각 α_1, α_2 라 한다. 이 거리측정 시스템 구조에서 평면경이 θ_1 만큼 회전하여 M_1 의 위치에 놓일 때 선분 r_1 선상의 모든 점은 CCD 센서의 점 p_1 에 투영되며, 평면경이 θ_2 만큼 회전하여 M_2 의 위치에 놓일 때 선분 r_2 선상의 모든 점은 CCD 센서의 점 p_2 에 투영된다. 즉, CCD 센서의 점 p_1 에 물체가 투영되면 물체는 선분 r_1 위의 어느 한 점에 위치해야 하며, 점 p_2 에 물체가 투영되면 물체는 선분 r_2 위의 어느 한 점에 위치해야 한다. 그러므로 평면경의 θ_1 과 θ_2 각도에서 CCD 센서의 p_1, p_2 에 투영된 물체는 선분 r_1, r_2 의 교차점 위에 위치해야 된다. 이러한 기하학적 관점에서 식 (4)과 식 (7)의 해는 선분 r_1 과 r_2 를 표현한 방정식의 해이다. 여기에서 주목할 점은 만일 거리 R 이 증가한다면 선분 r_1 과 r_2 의 기울기가 비슷해지기 때문에 거의 평행한 상태가 되므로 이것이 투영점 p_2 의 작은 에러가 거리 R 의 큰 오차의 원인이 될 수 있는 이유이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 θ_1 과 θ_2 의 차이 값을 크게 하면 선분 r_1 과 r_2 의 기울기 차이를 크게 할 수 있으며, 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

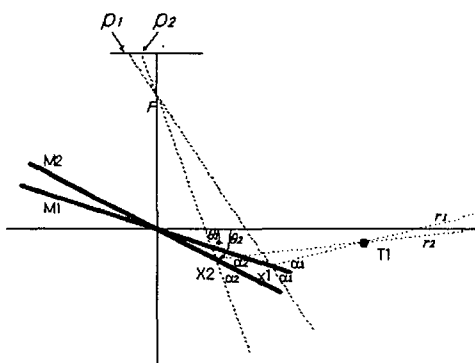


그림 2 회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템 원리의 기하학적 설명

Fig. 2 Geometrical explanation of the principle of the rotating mirror and mono camera-based depth measurement system

측정 각도 ϕ 에 대한 측정 오차는 아래 그림 2를 통해서 확인할 수 있는 바와 같이 p_2 로 인한 방향각의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서, 거리 R 이 클 때 R 의 오차가 증가할 수 있는데 비해 각도 ϕ 에 대한 오차는 작음을 알 수 있다.

3. 카메라 파라미터의 캘리브레이션

회전 평면경과 단일 카메라를 이용한 거리측정 시스템에서 캘리브레이션 해야하는 두 개의 카메라 파라미터는 카메라의 픽셀 간격과 초점 거리 f 이다. 여기서 픽셀 간격을 δ 라 하면, 두 픽셀의 위치 p_1 과 p_2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_1 = \delta q_1 \tag{8}$$

$$p_2 = \delta q_2 \tag{9}$$

위의 식에서 p_1 과 p_2 는 CCD 센서의 중앙으로부터의 실제 거리이고, q_1 과 q_2 는 CCD 센서의 중앙에서 p_1 과 p_2 까지 픽셀 수이다. 만일 픽셀 p_1 가 CCD 센서의 중앙 왼쪽에 위치한다면 q_1 은 음의 값을 갖는다.

식 (8)을 식(3)에 대입하면

$$R = \frac{-q_1 d}{\eta(\cos 2\theta_1 - \phi) + q_1(\sin 2\theta_1 + \phi)} \tag{10}$$

을 얻는다.

위 식(10)에서 η 는 픽셀 간격과 초점거리의 비율인 $\frac{f}{\delta}$ 로 정의되며, 초점거리가 픽셀 간격의 수로 표현된 값이다. 따라서 파라미터 η 를 이용함으로써 캘리브레이션 해야하는 파라미터의 수를 2개에서 1개로 줄일 수 있다. 또한 파라미터 η 를 이용하여 방향을 나타내는 ϕ 에 관한 식을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\eta q_2 \cos 2\theta_1 + q_1 q_2 \sin 2\theta_1 - \eta q_1 \cos 2\theta_2 - q_1 q_2 \sin 2\theta_2}{-\eta q_2 \sin 2\theta_1 - q_1 q_2 \cos 2\theta_1 - \eta q_1 \sin 2\theta_2 + q_1 q_2 \cos 2\theta_2} \right] \tag{11}$$

위에서 파라미터 η 는 알고있는 물체의 방향각 ϕ 와 물체와의 거리 R 을 식 (10)에 대입함으로써 구할 수 있다.

4. 측정 오차 민감도 분석 및 오차 최소화 방안

제한한 단일 카메라 시스템의 특성을 파악하기 위하여 오차 발생 요인인 p_2 에 따른 R 과 ϕ 의 민감도 식을 유도하여 오차의 유발요인을 분석하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 증명하였다.

4.1 측정 오차 민감도 분석

회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템을 이용하여 거리정보를 추출하기 위해서는 첫 번째 영상내의

픽셀 p_1 과 대응관계가 있는 두 번째 영상내의 픽셀 p_2 를 정확히 찾아야한다. 이 p_1 에 대응하는 p_2 를 찾는 과정에 오차가 발생할 수 있는데, 하나의 픽셀이 잘못 정합된 경우에 발생하는 거리오차와 방향오차를 각각 거리오차 민감도 및 방향오차 민감도라 정의한다.

회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템에서 픽셀이 잘못 정합된 경우의 거리측정 오차의 민감도를 고찰하였다. 민감도는 R 과 ϕ 에 대한 미분에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dR}{dp_2} = \frac{dR}{d\phi} \frac{d\phi}{dp_2} \tag{12}$$

그런데, 식 (4)를 이용하면, $\frac{dR}{d\phi}$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dR}{d\phi} = \frac{(-fp_1d \sin(2\theta_1 + \phi) + p_1^2d \cos(2\theta_1 + \phi))}{(f \cos(2\theta_1 + \phi) + p_1 \sin(2\theta_1 + \phi))^2} \tag{13}$$

식(6)의 우측부분의 분모와 분자를 각각 Ψ, ω 로 간략화 하면

$$\tan \phi = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \frac{\omega}{\Psi} \tag{14}$$

이므로, 위 식 (14)에서

$$\omega = fp_2 \cos 2\theta_1 + p_1 p_2 \sin 2\theta_1 - fp_1 \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2 \tag{15}$$

이고

$$\Psi = p_2 \sin 2\theta_1 - p_1 p_2 \cos 2\theta_1 - fp_1 \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2 \tag{16}$$

가 된다.

식 (14)를 ϕ 와 p_2 에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\cos^2 \phi} d\phi = \frac{\Psi \frac{d\omega}{dp_2} - \omega \frac{d\Psi}{dp_2}}{\Psi^2} dp_2 \tag{17}$$

위 식 (17)에서

$$d\omega = (f \cos 2\theta_1 + p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 \sin 2\theta_2) dp_2 \tag{18}$$

이고

$$d\Psi = (f \sin 2\theta_1 + p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 \cos 2\theta_2) dp_2 \tag{19}$$

이다.

식 (15), (16), (18), (19)를 식 (17)에 대입하고

$1 + \tan^2 \phi = \frac{1}{\cos^2 \phi}$ 을 이용하면 식 (20)을 얻을 수 있다.

식 (20)은 p_2 에 대한 방향각 ϕ 의 민감도이다. 따라서, 식 (13)과 식 (20)을 식 (12)에 대입하면 p_2 에 대한 R 의 민감도는 식 (21)로 표현된다.

식 (21)으로부터, 민감도 $\frac{dR}{dp_2}$ 는 R^2 에 비례하므로 거리 R 이 커짐에 따라 측정 정확도는 감소함을 알 수 있다. 또

$$\frac{d\phi}{dp_2} = \frac{f^2 p_1 \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - fp_1^2 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2) + fp_1^2}{(p_2^2 + f^2)p_1^2 + (p_1^2 + f^2)p_2^2 - 2fp_1 p_2 (p_1 - p_2) \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - 2p_1 p_2 (f^2 + p_1 p_2) \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dp_2} &= \frac{(-fp_1d \sin(2\theta_1 + \phi) + p_1^2d \cos(2\theta_1 + \phi))}{(f \cos(2\theta_1 + \phi) + p_1 \sin(2\theta_1 + \phi))^2} \cdot \\ &\quad \frac{f^2 p_1 \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - fp_1^2 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2) + fp_1^2}{(p_2^2 + f^2)p_1^2 + (p_1^2 + f^2)p_2^2 - 2fp_1 p_2 (p_1 - p_2) \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - 2p_1 p_2 (f^2 + p_1 p_2) \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)} \\ &= \frac{(-p_1 d)^2}{(f \cos(2\theta_1 + \phi) + p_1 \sin(2\theta_1 + \phi))^2} \cdot \frac{(f \cos(2\theta_1 + \phi) + p_1 \sin(2\theta_1 + \phi))}{d} \cdot \\ &\quad \frac{-f^2 \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + fp_1 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2) - fp_1}{(p_2^2 + f^2)p_1^2 + (p_1^2 + f^2)p_2^2 - 2fp_1 p_2 (p_1 - p_2) \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - 2p_1 p_2 (f^2 + p_1 p_2) \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)} \\ &= R^2 \frac{(f \sin(2\theta_1 + \phi) - p_1 \cos(2\theta_1 + \phi))}{d} \cdot \\ &\quad \frac{-f^2 \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + fp_1 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2) - fp_1}{(p_2^2 + f^2)p_1^2 + (p_1^2 + f^2)p_2^2 - 2fp_1 p_2 (p_1 - p_2) \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - 2p_1 p_2 (f^2 + p_1 p_2) \cos(2\theta_1 - 2\theta_2)} \tag{21} \end{aligned}$$

한 $\frac{dR}{dp_2}$ 은 평면경의 중심과 초점과의 거리인 d 에 반비례하므로 d 의 값을 크게 할수록 정확도를 높일 수 있다.

4.2 시뮬레이션을 이용한 측정 오차 분석

이 절에서는 앞 절에서 유도한 수식의 의미를 확인하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 오차 민감도를 그래프를 통하여 제시하고, 그 결과에 의해 시스템의 특성을 해석하였다.

그림 3은 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 12^\circ, R \in [1m, 10m], \phi \in [70^\circ, 85^\circ]$ 인 경우에 오차 민감도 변화를 보여준 그림으로, 이때, f 와 d 는 각각 (6mm, 200mm), (6mm, 100mm), (12mm, 200mm)

의 값들을 가질 때의 $\frac{dR}{dp_2}$ 와 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 의 그래프이다.

제한한 시스템의 근사화한 방정식과 시스템의 특성을 표현한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 이용한 분석은 다음과 같다.

1. $\sin(2\theta_1 - 2\theta_2)$ 이 $\cos(2\theta_1 - 2\theta_2)$ 과 비교하여 매우 작은 값을 갖지 않으며, $p_1 \ll f$ 이고 $p_2 \ll f$ 이면, 식 (21)의 거리오차 민감도는 다음 식과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{dR}{dp_2} \cong \frac{-R^2 f \sin(2\theta_1 + \phi) \sin(2\theta_1 - 2\theta_2)}{d(p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos(2\theta_1 - 2\theta_2))} \quad (22)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 p_2 는 f 에 비례하고, θ_2 는 θ_1 보다 크기 때문에 식 (22)는 초점거리 f 에 반비례한다. 아래 그림 3(a1)과 그림 3(a2)는 초점 거리의 변화에 따른 민감도

$\frac{dR}{dp_2}$ 의 변화를 표현한 그림으로서, 초점거리 f 를 두 배로

증가시켰을 때 $\frac{dR}{dp_2}$ 이 약 절반 가량 작아지는 것을 보여준 그림이다. 이때의 초점거리는 6mm이고 p_1 과 p_2 의 범위는 [-2mm, 2mm]이다. 또한 식 (22)를 통해서 거리오

차 민감도는 R^2 에 비례함을 알 수 있으며, 이는 $\frac{dR}{dp_2}$ 의 변화를 나타낸 그림 3(a1), 그림 3(a2), 그림 3(a3)를 통해 알 수 있다. 식 (22)에서 민감도는 d 에 반비례한다는 사실을 알 수 있다.

2. 방향오차 민감도의 식 (22)은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dp_2} \cong \frac{p_1 \sin(2\theta_1 - \theta_2)}{(p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos(2\theta_1 - \theta_2))} \quad (23)$$

p_1 이 초점 거리 f 와 비례 관계를 갖기 때문에, 방향오차 민감도는 f 에 반비례 관계를 갖는다. 그러나 방향오차 민감도는 R 과 d 에 직접적으로 영향 받지 않음을 알 수 있다. 그림 3(b1)과 그림 3(b2)는 초점거리 f 가 두 배로 커졌을 때

민감도 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 가 절반 가량 작아지는 것을 보여준 그림이다.

또한 d 를 두 배의 크기로 변화시켰을 때 민감도 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 이 변화하지 않는다는 사실을 그림 3(b1)과 그림 3(b3)를 통해 알 수 있다.

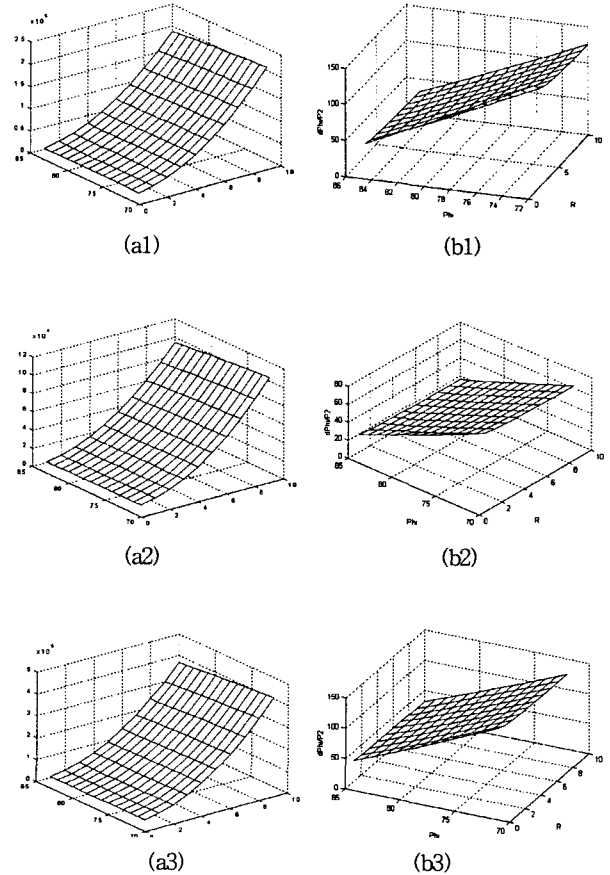


그림 3 $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 12^\circ$ 일 때 f 와 d 의 변화에 따른 민감도 $\frac{dR}{dp_2}$ 와 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 의 그래프

(a1) $f=6mm, d=200mm$ 일 때 $\frac{dR}{dp_2}$ 의 그림

(b1) $f=6mm, d=200mm$ 일 때 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 의 그림

(a2) $f=12mm, d=200mm$ 일 때 $\frac{dR}{dp_2}$ 의 그림

(b2) $f=12mm, d=200mm$ 일 때 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 의 그림

(a3) $f=6mm, d=100mm$ 일 때 $\frac{dR}{dp_2}$ 의 그림

(b3) $f=6mm, d=100mm$ 일 때 $\frac{d\phi}{dp_2}$ 의 그림

Fig. 3 Plots for sensitivity $\frac{dR}{dp_2}$ and $\frac{d\phi}{dp_2}$ with different f and d Angles θ_1 and θ_2 selected to be 0° and 12°

(a1) $\frac{dR}{dp_2}$ with $f=6mm, d=200mm$ (b1) $\frac{d\phi}{dp_2}$ with $f=6mm, d=200mm$

(a2) $\frac{dR}{dp_2}$ with $f=12mm, d=200mm$ (b2) $\frac{d\phi}{dp_2}$ with $f=12mm, d=200mm$

(a3) $\frac{dR}{dp_2}$ with $f=6mm, d=100mm$ (b3) $\frac{d\phi}{dp_2}$ with $f=6mm, d=100mm$

3. 서로 대응 관계에 있는 픽셀이 1 픽셀 잘못 정합 되었을 때 발생하는 거리측정 오차는 다음과 같이 추정할 수 있

다. CCD 센서의 크기가 $2mm \times 2mm$ 이고 200×200 의 픽셀로 이루어졌다면, 인접한 픽셀과의 거리는 $0.01mm$ 가 된다. 이러한 픽셀 간격을 이용하여 1 픽셀 오정합으로 인해 발생하는 오차를 추정할 수 있는데, 그림 3(a1)에서 $R \approx 10m$ 일 때 민감도는 약 2×10^5 이므로, 1 픽셀 정합오차의 추정 값은 $(2 \times 10^5) \times (0.01 \times 10^{-3}) = 2m$ 이 된다. 만일 초점 거리를 두 배로 늘리면 1 픽셀 정합 오차는 절반으로 줄어든 값인 $1m$ 이 된다.

4. 1 픽셀 오정합으로 인한 방향각 ϕ 의 측정 오차는 다음과 같이 추정할 수 있다. 그림 3(b1)에서 $\phi = 75^\circ$ 일 때 민감도는 약 100이다. 이때 추정된 측정 오차 값은 $(100) \times (0.01 \times 10^{-3}) = 1 \times 10^{-3}$ radian이다. 그러므로 1 픽셀 오정합으로 인한 방향각의 오차는 무시할 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 실험

본 실험에서는 초점 거리 f 가 $6mm$ 이고 픽셀의 수가 320×240 인 카메라를 이용하여 실제 거리측정 실험을 하였다. 이때 평면경의 크기는 $110mm \times 60mm$ 이고, d 의 거리는 $200mm$ 이다. 이 파라미터들은 시뮬레이션과 실험에서 공통으로 사용된 값들이다.

5.1 측정 시스템의 1 픽셀 오차 분석 시뮬레이션

4절에서 언급했듯이 q_1 과 q_2 는 CCD 센서 평면에 투영되는 픽셀 p_1 과 p_2 에 대한 픽셀의 수로 환산한 정수 값으로, CCD 센서의 중앙의 픽셀은 0이며, 중앙을 기준으로 좌측 부분은 음의 값으로 표현한다. 첫 번째 영상의 픽셀 p_1 은 두 번째 영상 내부의 상관관계를 갖는 픽셀 p_2 에 정합 되어야 한다. 거리와 방향각은 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있고, 방향각은 q_1 의 값에 의해 정해지나 거리는 q_2 의 값에 따라 변화하게 된다. 본 실험은 q_2 에 단위 오차를 주었을 때 거리와 방향각의 오차에 대하여 알아본 실험이다.

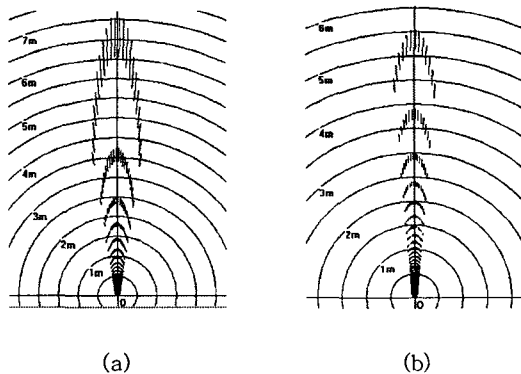


그림 4 평면경의 회전각에 따른 거리와 방향의 1 픽셀 오차 그림

- (a) $\theta_1 - \theta_2 = 6^\circ$ 인 경우의 1 픽셀 오차
- (b) $\theta_1 - \theta_2 = 10^\circ$ 인 경우의 1 픽셀 오차

Fig. 4 Distance and direction error caused by 1 pixel mismatching
(a) $\theta_1 - \theta_2 = 6^\circ$, (b) $\theta_1 - \theta_2 = 10^\circ$

그림 4는 평면경의 회전각 θ_1 과 θ_2 의 차이가 각각 10° 와 6° 일 때 q_1 에 대응하는 픽셀을 q_2 가 아닌 q_2+1 에 정합 시켰을 때 발생하는 오차를 계산한 그래프이다. 즉, (q_1, q_2) 과 (q_1, q_2+1) 의 한 쌍의 값을 이용하여 계산된 거리와 방향 정보를 극 좌표의 점으로 표현하고 두 점을 선으로 연결하였다. 그러므로 길이가 긴 선분은 큰 오차를 의미한다. 이 실험에서 q_1 은 -80에서 80까지 15 픽셀씩 증가시키고 q_1 에 대해 q_2 는 -80부터 5 픽셀씩 증가시키면서 1 픽셀 정합오류에 대해 알아보았다. 그림 4에서 알 수 있듯이 먼 거리일수록 선분의 길이는 길어지므로, 근거리에 비하여 먼 거리의 정확도는 작아지는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 거리가 멀어진다고 해도 방향각 오차는 초기 오차 값에 변화가 없으므로, 방향각의 정확도는 거리에 무관함을 알 수 있다. 그림 4(a)는 평면경의 회전각 θ_1 과 θ_2 의 차이가 6° 일 때 1 픽셀 오차를 나타낸 그래프이고, 그림 4(b)는 평면경의 회전각 θ_1 과 θ_2 의 차이가 10° 인 경우의 1 픽셀 오차 그래프이다. 그림 4(a)와 그림 4(b)를 비교하면 θ_1 과 θ_2 의 차이가 클수록 정확도가 커짐을 알 수 있다.

위 그림 4는 물체가 위치한 방향을 거의 90° 방향으로 고정하고 계산한 1 픽셀 오차의 그림이다. 그러나 평면경의 방향을 변화함으로써 측정 방향을 선택할 수 있다. 그림 5는 물체의 방향각 ϕ 가 $180^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ 일 때 결과를 도시한 것으로 평면경의 각도의 변화에 상관없이 측정 오차에는 변화가 없음을 알 수 있다.

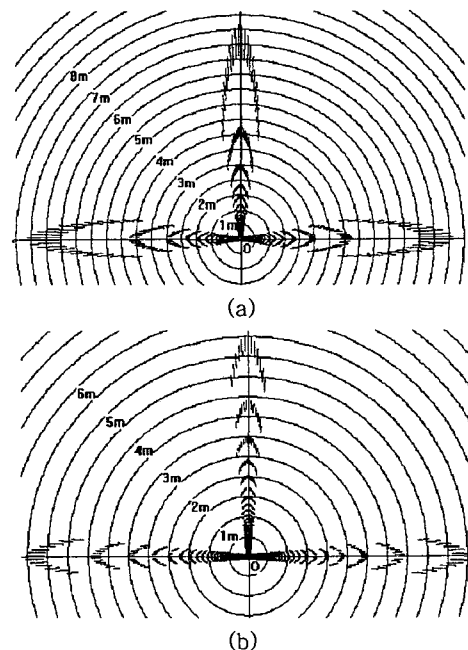


그림 5 θ_1 과 θ_2 의 차가 각각 6° 와 10° 일 때 3 방향에 대해서 1 픽셀 오정합에 대한 거리 및 방향측정 오차

- (a) $\theta_1 - \theta_2 = 6^\circ$ 인 경우 (b) $\theta_1 - \theta_2 = 10^\circ$ 인 경우

Fig. 5 Depth measurement error for 1 pixel mismatching for three different directions
(a) $\theta_1 - \theta_2 = 6^\circ$, (b) $\theta_1 - \theta_2 = 10^\circ$

5.2. 거리 측정 실험

회전 평면경과 단일 카메라를 이용한 거리측정 시스템을

구성하고 측정실험을 수행하였다. 그림 6은 측정된 거리와 실제 거리를 비교한 그림으로, 측정거리는 측정하고자 하는 물체의 방향을 $\phi=80^\circ$ 로 고정시켜 놓고, 거리를 변화시키면서 측정하였다. 그림 7에서 직선은 $\phi=80^\circ$ 방향에 위치한 물체의 실제 거리를 표현한 선분이고, 꺾어지는 부분을 작은 원으로 표시한 지그재그 형태의 선분은 제안한 시스템을 이용하여 거리를 측정하여 표현한 선분이다. 그림에서 오차의 형태는 실제 거리와 비교하여 불규칙하게 크게 측정되거나 작게 측정되었고, 거리가 멀어짐에 따라 오차가 커지나, 2.5m에서 오차가 약 10cm 이고, 2m이내의 물체인 경우에는 무시할 수 있는 크기의 오차를 갖는다. 먼 거리에 위치한 물체는 평면경을 시계방향으로 5° 회전 하면 화면을 벗어날 수 있으나, 큰 평면경을 이용하면 이러한 단점을 극복할 수 있다. 또한, 평면경이 회전하는 동안 획득한 여러 장의 동일한 물체의 각각의 쌍을 이루는 영상을 이용하여 거리를 측정 후, 평균을 취하면 더욱 정확한 측정값을 얻을 수 있다.

그림 7은 그림 6의 측정 실험시의 방향각 오차인데, 실제의 각도와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

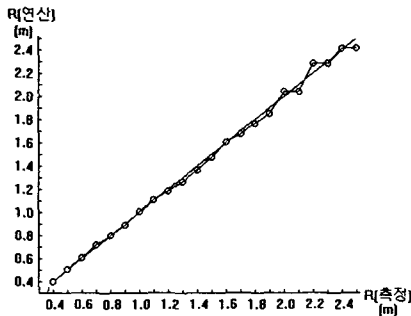


그림 6 거리 측정치 비교. 직선은 실제 거리이고 작은 원으로 표시된 그래프는 회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템에 의한 측정치

Fig. 6 Depth measurement error. The straight line corresponds to the graph with real depth and the graph with small circles indicates the real measurement

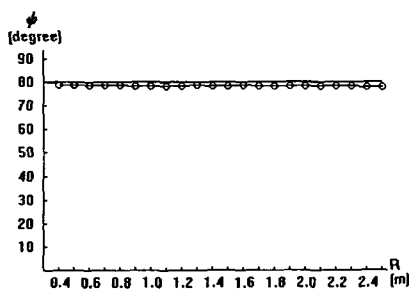


그림 7 방향 측정치 비교. 직선은 실제 각도이고 원으로 표시된 선은 회전 평면경과 단일카메라를 이용한 거리측정 시스템에 의한 측정치

Fig. 7 Angular measurement error. The straight line indicates the real angle and the graph with small circles indicates the measurement angles

6. 결 론

회전 평면경과 단일 카메라를 이용한 거리측정 시스템은 고정된 단일 카메라 앞에 회전하는 평면경을 설치하여, 평면경이 회전하는 동안 반사된 영상을 카메라를 통해 얻는 구조로서, 평면경이 회전할 때 먼 거리에 위치한 물체일수록 영상 내에서 빠르게 이동한다는 원리를 이용하여 거리를 계산하는 시스템이다. 본 논문에서는 회전 평면경과 단일카메라 시스템의 기하학적 구조로부터 거리 계산을 위한 식을 유도하였다. 또한, 카메라 파라미터들이 측정오차에 미치는 영향을 분석하기 위해 파라미터에 대한 오차의 민감도 계산 방법을 제시하였다. 그 결과 거리측정의 정밀도는 평면경과 수직인 방향에서 가장 높으며, 카메라와 평면경간의 거리가 멀수록, 근접한 물체일수록 더 정확한 거리를 측정할 수 있음을 증명하였다. 또한 방향측정 정밀도는 측정 물체의 거리에 무관하게 일정함을 알 수 있었다.

측정 실험 결과에서 보여지는 것처럼 이 시스템의 거리측정 오차는 양의 값과 음의 값을 가질 수 있으므로 반복된 측정치의 평균을 이용하면 더욱 정확한 측정 결과를 얻을 수 있다. 또한, 카메라가 회전하는 동안 영상을 연속 촬영하여 측정하므로 측정점의 연속 추적에 의해 정확한 경합과 이를 통해 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. T. Barnard and M. A. Fischler, "Computational stereo," *ACM Computing Surveys*, vol. 14, no.4, pp. 553-572, 1982.
- [5] 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)
- [6] 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)

- [7] W. Choi, C. Ryu, and H. Kim, "Navigation of mobile robot using mono-vision and mono-audition," *IEEE Computer*, vol. 22, No. 6, pp. 46-57, 1989.
- [8] J. T. Feddema, and C. S. G. Lee, "Adaptive image feature prediction and control for visual tracking with a hand-eye-coordinated camera," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 5, pp.1172-1183, September/October 1990.
- [9] N. P. Papanikolopoulos, P. K. Khosla, and T. Kanade, "Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: A combination of control and vision," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 1, pp. 14-35, February 1993.
- [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] S. Nene and S. Nayar, "Stereo with mirrors," *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 1087-1094, Jan. 1998.
- [12] S. K. Nayar, "Sphero: 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] 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.
- [14] 김형석, 송재홍, 한후석, "회전 평면경 영상의 단일 카메라 투영에 의한 거리측정," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제7권 제9호 2001. 9

저 자 소 개



김형석(金炯奭)

1956년 1월 21일생. 1980년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1982년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업. 1992년 University of Missouri, Columbia, Dept. of Electrical and Computer Eng. 박사. 1993. 09 ~ 현재 전북대학교 부교수.
Tel : 063-270-2477, Fax : 063-270-2451
E-mail : hskim@moak.chonbuk.ac.kr



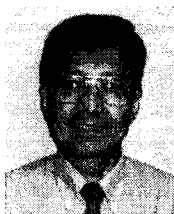
나상익(羅相益)

1976년 2월 9일생. 2002년 전북대 제어계측공학과 졸업. 2002년 ~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정
Tel : 063-270-2477
Fax : 063-270-2451
E-mail : hunter209@mail.chonbuk.ac.kr



한후석(韓后錫)

1958년 10월 24일생. 1987년 전북대 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 의용생체 공학과 박사. 현재 기초전력연구소 선임연구원. Tel : 02-871-6509, Fax : 02-883-0827
E-mail : han@er.snu.ac.kr



Chun-Shin Lin

1971년 Chiao-Tung University, Shin Chu, Taiwan 전기공학과 졸업. 1973년 동대학원 전기공학과 석사. 1977 State University of New York 전자공학과 석사. 1980년 Purdue University 전자공학과 박사. 1987 ~ 현재 University of Missouri-Columbia 교수