

이동로봇의 장애물과의 충돌방지를 위한 새로운 3차원 거리 인식 방법

송재홍, 나상익, 김형석
전북대학교 전자정보공학부

전화 : 063-270-2477/ 핸드폰 : 011-9641-0420

A Novel Depth Measurement Technique for Collision Avoidance Mobile Robot

Jae-Hong Song, Sang-Ik Na, Hyong-Suk Kim
Div. of Electronics and Information Engineering Chonbuk National University
E-mail : jhsong@mail.chonbuk.ac.kr

Abstract

A simple computer vision technology to measure the middle-ranged depth with mono camera and 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 feature in the proposed system, the principle of the depth measurement based on the relation of the pixel movement and the distance of object have been 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.

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^[3] 등이 있으나, 초음파 센서는 지향성이 약하고 반사에 의한 오측정이 많으며, 레이저 센서는 매우 고가이고 측정할 수 있는 면적이 좁다. 넓은 범위에 대해서 한꺼번에 거리를 측정할 수 있는 스테레오 비전은 카메라들이 매우 정밀하게 설치되어야 하고, 두 카메라의 특성이 다를 경우 혹은 충격이나 경년의 변화에 의해 오차가 발생하며^{[4][5]}, 두 세트의 영상획득장치(고속의 A/D 보드)가 필요하기 때문에 설치비용이 고가라는 취약점이 있다. 이러한 취약점을 극복하기 위하여 본 논문에서 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 시스템을 개발하였다.

II. 물체의 거리와 카메라에 투영된 화소와의 관계

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 비례하여 증가한다는 원리를 이용한 것이다.

그림 1에서 카메라 렌즈 축과 평면경이 만나는 점을 O라하고 점 O에서 물체 T까지의 거리를 R이라 하자. 이 때 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 O 까지의 거리를 d 라 하자. 평면경과 X축이 이루는 각을 $-\theta_1$ 라하고 물체 T 가 평면경을 통하여 반사되는 위치를 T' 라 하면 선분 OT' 이 평면경과 이루는 각은 $\theta_1+\psi$ 이며 X축과는 $2\theta_1+\psi$ 의 각이 된다.

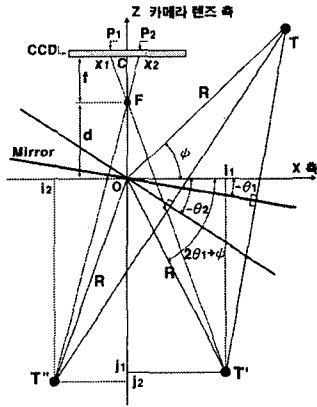


그림 1. 광각 회전에 의한 거리 측정

거울 속의 물체 T' 가 Z축에 투영되는 위치를 j_1 라 하면

$$j_1 = R\sin(2\theta_1 + \psi) \quad (1)$$

이다. 또, T' 의 X축에 대한 성분을 i_1 이라고 하면,

$$i_1 = R\cos(2\theta_1 + \psi) \quad (2)$$

가 된다. 그런데, 카메라의 pin hole 모델에서 T' 가 투영되어 CCD 평면에 맺히는 위치를 p_1 이라 하면, $\triangle FT'j_1$ 와 $\triangle Fp_1C$ 의 닮은꼴 구조에서

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

이 된다. (3)을 시간에 대하여 미분하고 다시 정리하면

$$\dot{p}_1 = 2 \frac{(f + \frac{fd}{R} \sin(2\theta_1 + \psi))}{(\frac{d}{R})^2 + 2(\frac{d}{R}) \sin(2\theta_1 + \psi) + \sin^2(2\theta_1 + \psi)} \dot{\theta}_1 \quad (4)$$

이 된다. 평면경이 속도 $\dot{\theta}_1 (= \pi \text{ rad/sec})$ 로 회전하고 있을 때, 카메라에 투영되는 화소의 속도는 (4)와 같이 거리 R 의 함수이다. 즉, 평면경이 회전하는 동안 카메라에 포착된 화소점의 속도가 느리면 가까운 물체이고 속도가 크면 멀리 있는 물체임을 의미한다.

미분식에 의한 계산은 잡음 등의 영향에 의해 정확한 계산이 어렵고 모든 화소점들의 거리를 알 필요가 없기 때문에 평면 거울이 일정한 각도만큼 움직였을 때 식별성이 우수한 특징점들이 이동한 화소의 거리를 측정하여 물체까지의 거리를 계산하는 방법을 제안한다. 평면경이 그림 1과 같이 시계방향으로 회전한다고 가정할 때, 평면경과 x축이 이루는 각을 $-\theta_1$ 라하고 더 회전하여 얻은 평면경과 x축의 각도를 $-\theta_2$ 라고 하자. $-\theta_2$ 의 위치에서 (3)과 같이 식을 얻으면,

$$\frac{\dot{p}_2}{f} = \frac{-R\cos(2\theta_2 + \psi)}{d + R\sin(2\theta_2 + \psi)} \quad (5)$$

이 된다. θ_1 과 θ_2 는 거울의 회전각이므로 외부에서 측정가능하고, d 는 카메라초점에서 거울까지의 거리, p_1 과 p_2 는 영상에서 측정하는 값이므로 R 과 ψ 만이 미지수가 된다. (3)과 (5)를 R 에 대하여 정리하면

$$R = \frac{-p_1 d}{f(\cos 2\theta_1 \cos \psi - \sin 2\theta_1 \sin \psi) + p_1(\sin 2\theta_1 \cos \psi + \cos 2\theta_1 \sin \psi)} \quad (6)$$

및

$$R = \frac{-p_2 d}{f(\cos 2\theta_2 \cos \psi - \sin 2\theta_2 \sin \psi) + p_2(\sin 2\theta_2 \cos \psi + \cos 2\theta_2 \sin \psi)} \quad (7)$$

이 된다. (6)과 (7)을 이용하면,

$$\begin{aligned} & (p_2 f \cos 2\theta_1 + p_2 p_1 \sin 2\theta_1 - p_1 f \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2) \cos \psi \\ & = (p_2 f \sin 2\theta_1 - p_2 p_1 \cos 2\theta_1 - p_1 f \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2) \sin \psi \end{aligned} \quad (8)$$

관계식을 얻을 수 있으므로

$$\frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{fp_2 \cos 2\theta_1 + p_1 p_2 \sin 2\theta_1 - fp_1 \cos 2\theta_2 - p_1 p_2 \sin 2\theta_2}{-fp_2 \sin 2\theta_1 - p_1 p_2 \cos 2\theta_1 - fp_1 \sin 2\theta_2 + p_1 p_2 \cos 2\theta_2} \quad (9)$$

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, X축과 물체의 각도 ψ 를 (9)에 의해 계산할 수 있으며, 이 ψ 를 (6) 혹은 (7)에 대입하면 평면경의 중심점으로부터 물체까지의 거리 R 을 계산할 수 있다.

III. 실험 및 고찰

제안한 단일 카메라에 의한 거리 측정시스템의 특성을 파악하기 위해서 시뮬레이션과 실측실험을 수행하였다. 이 실험을 위한 카메라의 정렬을 위해서 그림 1과 같이 카메라의 정면에 설치된 평면경이 회전하는 동안, 카메라에 포착된 화소점들이 영상의 수평축과 평행하게 이동하도록 카메라와 평면경의 회전축을 정렬하였다.

3. 1 제안한 거리 측정시스템의 특성 시뮬레이션

제안한 거리 측정 장치를 사용하여 물체의 위치를 계산하기 위해서는 평면경이 회전하기 이전의 화소 위치 q_1 과 평면경이 회전하여 이동한 화소 위치 q_2 를 알아야 한다. q_1 과 q_2 의 특징점 간의 정합 오차 시뮬레이션은 q_2 에 정합 되어야 할 화소점이 q_2+1 인 위치에 정합 되었을 때의 오차를 계산하였다.

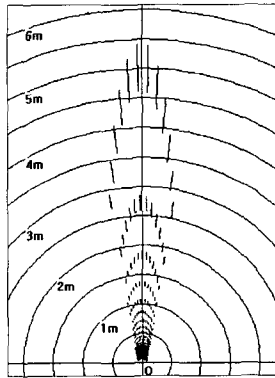


그림 2. 1 화소 오정합에 대한 거리 및 방향 측정오차

그림 2는 $q_1=0$ 에서 시작하여 15 화소씩 증가시키고 각 q_1 에 대해서 q_2 는 5 화소씩 증가시키면서 1 화소 정합오류를 그림으로 표시하였다. 그림 2에서 실선은 각 위치의 물체가 1 화소 정합오류가 발생했을 경우, 거리와 방향의 오차를 나타낸다. 그림 2에서 근거리의 물체에 대해서는 1 화소의 정합 오류가 거리 계산에 매우 작은 영향을 준다는 것과 동시에 측정거리 정밀도가 크다는 것을 알 수 있다.

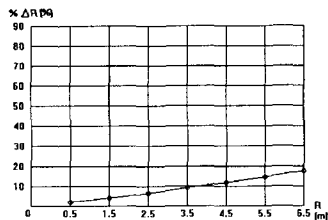


그림 3. 그림 4에서 $\psi=70$ 방향의 각 거리에서의 거리 오차율

그림 3은 $\psi=70$. 방향의 물체들에 대하여 1 화소 오정합이 발생할 경우의 거리오차를 각각의 거리로 나누어 오차율을 그린 것이다. 그래프에서 근거리일수록 정밀한 측정이 가능하며 원거리가 될수록 오차가 증가함을 알 수 있다.

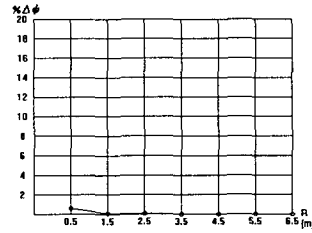


그림 4. 그림 2 에서 $\psi=70$. 방향의 각 거리에서 방향 오차율

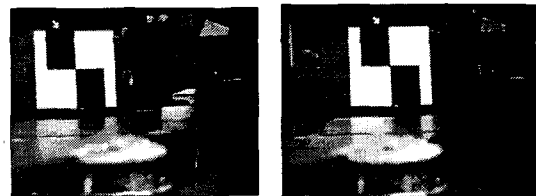
그림 4는 1 화소 정합오류가 발생할 때의 거리에 따른 방향 계산 오류율인데, 최대 0.7% 정도의 미소한 오차가 발생하며 그것도 근거리에서만 발생하므로 화소값 오정합에 의해 발생하는 각도 계산오류는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

3. 2. 제안한 시스템에 의한 거리 측정 실험

3. 2. 1 거리에 따른 화소의 이동거리 측정

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 320×240 이고 초점 거리 6mm이며 평면경은 가로 및 세로 방향의 길이가 각각 110mm 및 60mm인 소형이다. 또한, 카메라와 평면경 사이의 거리는 200mm가 되도록 시스템을 구성하였다.

그림 5(a)는 평면경을 통해서 고정 카메라에 의해 얻어지는 영상으로서 회전하기 이전의 영상이고 그림 5(b)는 평면경이 5. 만큼 시계방향으로 회전했을 때 얻어지는 영상의 예이다.



(a) (b)

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

그림 6의 그래프는 카메라와 평면경 사이의 거리가 각각 10 cm, 20 cm, 및 30 cm 인 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 있다. 따라서 기존의 시스템이 갖는 폐색(occlusion)문제가 없다는 장점이 있다. 그림 6의 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안한 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.

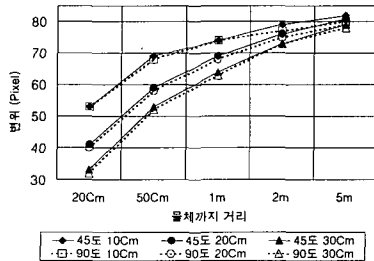


그림 6. 거리에 따른 화소의 변위 (카메라와 평면경간의 거리와 회전 각도가 다른 경우)

3.2.2 거리 측정오차의 비교

본 실험에서는 제안한 측정시스템을 구성하여 실제거리 계측실험을 수행하였으며 실제의 거리와 비교하였다. 그림 7은 $\psi = 80$. 방향에 위치한 물체들에 대해서 계산한 거리와 실측에 의한 거리와의 비교 그래프이다. 그림 7에서 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.

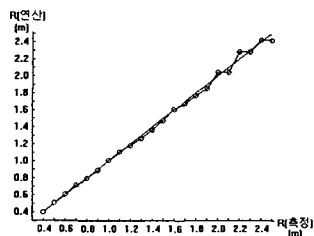


그림 7. 거리 측정 치 비교. 직선은 실제거리이고 곡선은 제안한 시스템에 의한 측정치

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.

IV. 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 이동속도와 거리간의 관계를 규명하였다.

시스템의 특징은 카메라와 평면경간의 거리가 멀수록 원거리에서도 거리 측정의 정밀도가 증가하고, 거리가 멀수록 정밀도가 감소하는 특징이 있지만, 약 5 m 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.

참 고 문 헌

- [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] H. Zhuang, R. Sudhakar, 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.
- [4] 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)
- [5] 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)