

원형 물체를 이용한 로봇/카메라 자세의 능동보정

Active Calibration of the Robot/Camera Pose using Cylindrical Objects

한 만 용, 김 병 화, 김 국 현, 이 장 명

(Man Yong Han, Byung Hwa Kim, Kook Hun Kim, and Jang Myung Lee)

Abstract : This paper introduces a methodology of active calibration of a camera pose (orientation and position) using the images of cylindrical objects that are going to be manipulated. This active calibration method is different from the passive calibration where a specific pattern needs to be located at a certain position. In the active calibration, a camera attached on the robot captures images of objects that are going to be manipulated. That is, the prespecified position and orientation data of the cylindrical object are transformed into the camera pose through the two consecutive image frames. An ellipse can be extracted from each image frame, which is defined as a circular-feature matrix. Therefore, two circular-feature matrices and motion parameters between the two ellipses are enough for the active calibration process. This active calibration scheme is very effective for the precise control of a mobile/task robot that needs to be calibrated dynamically. To verify the effectiveness of active calibration, fundamental experiments are performed.

Keywords : activecalibration, circular-feature, images, ellipse

I. 서론

이동/작업용 로봇은 이동 로봇과 작업 로봇을 직렬로 결합하여 잉여 다관절 로봇[1]을 구성한 것으로 다변화하는 작업환경에 다양하게 적용될 수 있다. 이처럼 다양한 일을 수행할 수 있지만 실제 환경에서 이동 로봇을 제어할 경우는 많은 불확실성이 포함되어 있어 미지의 환경에서 제어 오차를 극복하여 정밀한 자세제어를 수행하는 것이 매우 중요한 연구 과제 중의 하나이다. 이를 위해서는 미지의 환경에서 능동적으로 제어 오차를 보정할 수 있는 기구나 방법에 대한 연구가 필요하다.

로봇/카메라의 자세를 보정하는 방법에는 수동적인 방법과 능동적인 방법이 있다. 기존의 수동적인 보정 방법으로 Tsai[2]는 고정되어 있는 정밀한 카메라 보정판을 이용하여 카메라의 내부 파라미터와 카메라의 자세를 보정하는 방법을 제시하였다. 이 카메라 모델은 카메라의 자세를 포함하고, 카메라가 로봇의 핸드에 부착되어 있으므로 카메라의 자세를 구하게 되면 로봇의 매니퓰레이터의 자세를 구할 수 있게 된다. 이 방법은 좌표 측정 기계에 부착되어 이동되는 보정판을 이용하여 로봇/카메라 시스템의 보정을 수행하는 수동적인 보정 방법의 중심적인 역할을 했다.

반면에 능동보정 기법은 카메라가 이동되는 능동시각(active vision)에 의해 보정되는 방법[3][4]와 카메라의 파라미터들을 인식할 필요가 없고 물체의 위치 정보를 사전에 필요로 하지 않고 단지 화상의 특징자의 대응을 이용하여 보정을 수행하는 자율적인 보정방법[5][6]으로 구분된다. 이 방법에 대한 연구로써 Bennett와 Holler-

bach[7]은 폐 기구형 연결을 통해 단지 내부적인 시각 정보만을 이용하여 보정을 수행할 수 있는 능동보정 방법을 제시하였다. 이 시스템은 로봇의 핸드에 스테레오 카메라계를 부착하였으며, 각 카메라는 선별된 축에 대해 단방향으로만 회전을 수행할 수 있었다. Luong와 Faugeras[8]는 하나의 이동 카메라에 의해 얻어진 세 개의 연속 화상으로부터 각 프레임간의 점 대응 관계를 이용하여 카메라의 자세를 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 로봇에 단일 카메라를 부착하여 로봇의 이동에 의해 작업환경에서 움직이는 동안에 작업 물체를 대상으로 얻어진 두 개의 화상을 이용하여 능동적으로 카메라의 자세를 보정하는 방법을 제시하였다. 제시하는 방법은 로봇/카메라를 움직이므로 능동시각을 갖게 되고 원형특징자인 원형계수행렬을 추정하여 보정을 실현함에 따라 자율적으로 보정을 수행할 수 있으므로 보정 방법에 있어서 능동적인 기능과 자율적인 기능을 동시에 갖게되어 이동/작업 로봇의 작업능력을 향상시킬 수 있으며 효율적인 보정을 수행할 수 있다. 따라서 본 연구는 기준 좌표계에 대한 물체의 위치정보를 사전에 인지할 필요가 없으며, 환경에 놓여 있는 물체의 이미지를 이용하여 직접적으로 보정을 수행할 수 있는 기법이다. 특히 의료기 분야의 로봇과 같이 원격으로 제어되는 로봇들에 있어서 매우 실용적으로 적용할 수 있다.

화상처리과정에서 물체와 화상간의 특징자들을 대응하는 방법에 있어서 기존에는 점이나 직선 대응 관계를 이용하였다. 작업환경에서 물체를 형성하는 정보들은 점, 직선, 곡선 등으로 분류되어지는데 점과 직선을 이용하여 화상간의 대응을 구할 경우에는 여러 가지 어려운 문제들이 있다. 취득된 화상에는 많은 점의 특징과 직선의 특징들이 있으므로 실제 작업환경에서 이런 특징자들의 대응 관계를 수행하기 위해서는 어려우며 많은 시간이 소요된다. 이러한 어려움들은 점과 직선의 특징자들이

접수일자 : 1998. 4. 30., 수정완료 : 1998. 11. 30.

한만용, 김병화, 이장명 : 부산대학교 전자공학과

김국현 : 전기연구소

※ 본 연구는 부산대학교 기성회 재원 학술연구 조성비에 의한 연구입니다.

화상간의 대응에 필요한 유일한 정보를 충분하게 갖고 있지 않기 때문이다. 한편 곡선의 특징자를 추출할 수 있는 원형 물체는 다음 이유 때문에 3D 위치 추정에 있어서 많이 이용되어진다. 첫째, 실제 환경에서는 많은 제조 물체들이 원형 구멍이나 원형 표면을 갖고 있으며, 둘째, 원은 수학적인 어떤 임의적인 방위에 있어서 그 자체의 투사적인 투영(perspective projection)은 항상 정확한 타원으로 변형되는 기하학적인 성질을 지니고 있으며 타원을 구성하고 있는 점들은 중심을 통해 대칭으로 구성되어 있다. 셋째, 카메라에 투영된 원형 특징에 대한 예지와 원호를 이용하면 정확한 점 대응을 구하지 않고서도 물체의 위치를 추정할 수 있다.

따라서 원형 물체를 취급할 경우에는 곡선 특징자를 이용하는 것이 점이나 직선 특징자를 이용하는 것보다 합리적이고 간결하기 때문에 화상 특징자의 대응 관계에 대한 연구에 있어서도 이전에는 대부분 점과 직선[9][10]을 이용하여 보정을 수행하였으나 Lenz와 Tsai[11]는 원형적인 형태가 카메라 보정을 위하여 이용될 수 있음을 보여 주었으며, Haralick[12]은 2차 곡선을 이용하여 카메라의 자세를 측정하는 것을 설명하였다. Ma[13]는 화상의 곡선의 대응 관계를 이용하여 스테레오 코닉(conic)에 의한 3차원 물체의 복구, 카메라의 운동 파라미터의 추정과 자세를 구하는 방법을 설명하였다.

본 논문에서는 원형 물체를 취급함에 있어 Ma의 곡선 대응 관계를 이용하여 카메라의 자세를 능동적으로 보정할 수 있는 방법을 수행하였다. 본 연구의 능동보정 방법은 로봇에 하나의 카메라를 부착하여 로봇의 이동에 의해 두 개의 관찰점(viewpoint)을 선정하고 이로부터 얻어진 두 개의 화상을 이용하여 카메라와 물체간의 상대 위치와 상대 회전을 구함으로써 로봇의 자세를 능동적으로 보정할 수 있는 방법이다. 보정에서 중요한 절차는 로봇의 이동에 의해 원형 물체에 대하여 두 개의 화상의 특징자를 추출하고, 두 개의 화상 특징자와 물체의 특징자간의 대응 관계를 구하고, 대응된 특징자의 쌍으로부터 카메라의 위치와 방향을 추정하는 기법이다.

II장에서 원통 물체로부터 얻어진 화상에서 구해진 타원의 좌표들을 이용하여 원형 변수들을 구하는 방법을 설명하고 III장에서는 원형 특징자를 이용한 카메라 모델을 구성하여 II장에서 구한 원형 변수를 이용하여 능동보정을 수행하는 방법을 제시하였으며, IV장에서는 카메라의 자세를 구하는 수치적 실험을 하였으며, 마지막으로 V장에서는 결론과 앞으로의 과제를 살펴본다.

II. 원형 변수의 추정

카메라 자세의 능동보정 방법을 설명하기 이전에 보정 수행에 필요한 원형 특징자의 변수를 구하는 방법을 먼저 제시한다. 공간상의 원형 물체는 카메라의 화상에 투영되어지고 공간상의 원형 물체가 가지고 있는 원형 성질과 카메라의 화상에 투영된 타원에 대한 원형 성질은 투영 투사 구조에서 그 성질이 변하지 않는다[14]. 화상 면의 타원을 나타내는 행렬을 원형 변수라 하고, 원형 변수는 투영 불변의 성질에 의해 직접 정의되는 2차

곡선이다. 이런 불변적인 투영 평면에서의 원형 성질은 비전 응용에서 매우 유용하게 사용되어지며 원형 성질을 이용하기 위해서는 원형 물체에 대한 화상의 원형 변수를 구하여야 한다.

원형 변수에 대하여 수행되는 대부분의 연구 결과는 평면에서 원형 곡선(conic)을 정의하는 2차 동차식으로부터 유도된다. 화상 평면에서 점 (X, Y)가 동차 좌표, $u = [X \ Y \ 1]^T$ 로 나타내어지면 화상 평면에서의 타원의 2차 곡선식은 다음과 같이 주어진다.

$$aX^2 + bXY + cY^2 + dX + eY + f = 0 \tag{1}$$

위 식은 2차 곡선의 일반식으로서 a와 c는 고유치와 관계가 있으며, b는 정규직교좌표와 기준 좌표간의 회전을 나타내고, d와 e는 정규직교좌표의 이동을 나타낸다. 위의 식을 계수와 동차좌표의 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$u^T A u = 0 \tag{2}$$

위의 식에서 A는 2차 곡선의 계수들로 구성되어 있는 대칭 행렬이며 원형변수라 정의하고 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} a & b/2 & d/2 \\ b/2 & c & e/2 \\ d/2 & e/2 & f \end{bmatrix} \tag{3}$$

화상의 원형변수, A를 추정하기 위해서는 원형에 대한 화상의 좌표, (X, Y)가 필요하다. 이를 위해서는 화상을 취득한 후 화상 처리를 통해 얻어진 화상에서 타원의 좌표를 구하게 된다. 이때 화상 취득 및 화상 처리 과정에서 추출된 곡선에 대하여 오차가 발생할 수 있으므로 이 오차를 최소화하기 위해 구해진 화상 좌표들을 곡선에 적합시켜 원형변수를 추정한다. 이를 위해 오차 함수(error function)를 정의하고, 이 오차 함수를 최소화하는 것으로 원형 변수를 구할 수 있다. 곡선의 적합을 이용하여 원형 변수를 구하는 방법으로는 추종되어지는 파라미터의 수, 정확성의 범위, 소요되는 계산 시간에 따라 여러 가지 방법이 있다.

타원의 형태를 적합하기 위한 점들의 집합을 (X_i, Y_i) $i=1, N$ 이라 하고 타원의 일반적인 (1)의 값을 $\phi(X, Y)$ 라 하고, 주어진 화상의 점 (X_i, Y_i) 에서 $\phi(X, Y)$ 의 값을 살펴보면 점이 타원 위에 있으면 값이 0이고, 점이 타원의 안쪽에 있으면 음의 값이고, 타원의 바깥쪽에 있으면 양의 값이다. 본 논문에서는 원형 형태를 주어진 N개의 점들의 집합에 적합하기 위한 방법으로 최소 자승 오차 기준(least-square error criterion)을 사용하고, 오차 E를 최소화하는 오차 함수는 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=1}^N [\phi(X_i, Y_i)]^2 \tag{4}$$

(1)에서 2차 곡선의 계수를 벡터 $w = [a \ b \ c \ d \ e \ f]$, 2차 곡선의 X, Y항들을 벡터 $v = [X^2 \ XY \ Y^2 \ X \ Y \ 1]$ 로 정의하면 오차함수는 다음과 같이 다시 정리된다.

$$E = \sum_{i=1}^N [w \ v_i^T]^2 = w Z w^T \tag{5}$$

$$Z = \sum_{i=1}^N v_i^T v_i \quad (6)$$

위 식에서 Z는 벡터 v에 의해 6 × 6의 행렬로 나타내어지며 주어진 점 (X, Y)들의 함수로써 부분적으로 0으로 채워지는 계수 행렬이다.

오차함수의 목적은 2차 곡선의 계수벡터를 구하는 것이며 오차 함수에 제약조건과 해를 구하는 방법을 다르게 하면 여러 가지 방법으로 곡선계수 벡터를 구할 수 있다. 본 논문에서는 수치실험을 효율적으로 수행하기 위해 2차 곡선의 식에서 f = -1로 두고 원형변수를 구하였다.

III. 카메라 자세의 능동보정

로봇에 부착되어 있는 하나의 카메라의 자세는 로봇의 이동에 의해 얻어진 두 개의 화상으로부터 능동보정이 수행되어 구해지고, 카메라 자세의 능동보정은 공간상의 기준 좌표계에 놓여 있는 원통 물체의 원형변수와 카메라의 화상 평면에 투영된 화상 곡선의 원형 성질을 나타내는 행렬의 대응 관계를 이용하여 수행되어 진다. 원형물체를 이용하여 능동보정을 수행하는데 필요한 카메라의 투사모델과 카메라 자세에 대한 기하학적 구조를 제시하고 설명한다.

1. 카메라의 투사 모델

카메라의 능동보정을 수행하기 이전에 공간상의 2차 곡선이 카메라에 투사되는 카메라의 투사 모델의 관계를 알아본다. 카메라의 투사 모델(perspective model)은 화상 평면에서의 화상 위치와 카메라 좌표계 상에서의 실제 물체의 위치간의 관계를 나타낸다

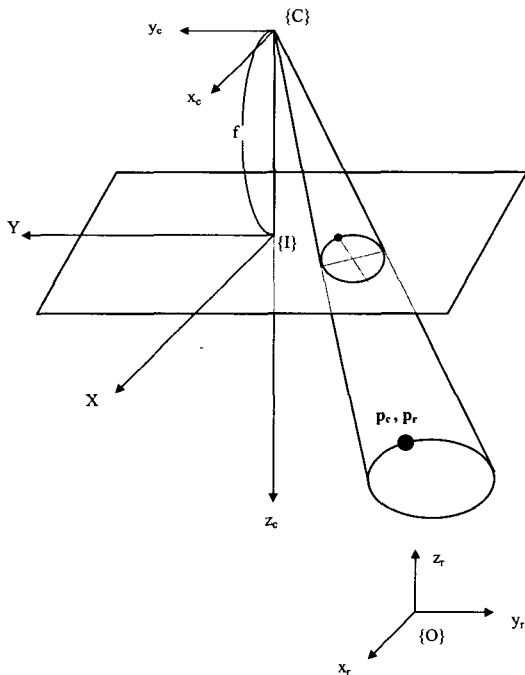


그림 1. 원형 특징자를 이용한 카메라의 투사 모델.
Fig. 1. Perspective model of camera using circular feature.

그림 1은 공간상에 놓여 있는 원형물체가 카메라에 투사되어지는 기하학적 투사모델을 나타낸 것이다. 카메라의 좌표계, {C}는 광축의 중심에 설정하며, Zc축은 광축과 일치한다. 좌표계 {I}는 카메라의 화상 좌표계로서 카메라의 좌표계로부터 초점거리 F만큼 떨어진 화상 평면 위에 설정하고, 물체 좌표계와 기준 좌표계는 동일하게 두고 좌표계 {O}로 표시하였다.

공간상에 놓여 있는 물체를 카메라에 투사할 경우 물체 위의 어떤 점은 카메라의 좌표계로 표시된 pc값과 기준 좌표계를 기준으로 표시된 pr로 나타낼 수 있으므로 카메라 좌표계와 기준 좌표계간의 관계는 다음과 같다.

$$p_c = R_o p_r + t_o \quad (7)$$

여기서 Ro과 to는 두 좌표계간의 회전행렬과 위치벡터를 나타낸다.

로봇이 능동적으로 위치와 방위에 대한 보정을 수행하기 위해서는 하나의 카메라를 이용하였을 경우 카메라의 이동을 통하여 취득한 여러 장의 화상이 필요하다. 본 논문에서는 단일 카메라에 의해 얻어진 두 개의 다른 화상을 이용하여 보정을 수행하는 방법을 제시하며, 이것은 두 대의 카메라를 이용하여 동시에 두 화상을 취득하는 스테레오 비전에 쉽게 이용할 수 있다.

하나의 카메라를 부착한 로봇이 두 단계로 이동하여 두 장의 화상을 취득하는 카메라의 자세에 대한 기하학적 구조를 그림 2에 나타내었다. 여기서 로봇의 이동에 의한 두 지점의 시각 위치(viewpoint)와 관련하여 카메라의 좌표계를 {C1}, {C2}라 하고 두 좌표계간의 변환관계는 다음과 같다.

$$p_{c2} = R p_{c1} + t \quad (8)$$

여기서, R은 카메라의 두 좌표계 {C1}과 {C2}간의 회전을 나타내는 상대회전행렬이고, t는 카메라의 두 좌표계간의 광축의 이동위치를 나타내는 상대 이동벡터이고, pc1과 pc2는 공간상의 어떤 점을 카메라의 좌표계, {C1}과 {C2}로 나타낸 벡터로 다음과 같이 정의된다.

$$p_{c1} = [x_{c1} \ y_{c1} \ z_{c1}]^T \quad (9)$$

$$p_{c2} = [x_{c2} \ y_{c2} \ z_{c2}]^T \quad (10)$$

로봇의 기구와 핸드/아이 보정이 수행되어 있다고 가정하면 카메라 좌표계간의 변환은 회전행렬 R과 이동벡터 t로 나타낼 수 있으며 카메라의 이동 파라미터로 로봇에 부착된 하나의 카메라가 이동하는 위치와 회전을 나타내므로 로봇의 핸드를 제어하는 과정에서 알 수 있는 값이다.

그림 2에서 로봇의 이동에 의한 카메라 좌표계 {C1}과 {C2}의 원점을 각각 광축의 중심 O1과 O2라 한다. Zc1과 Zc2축은 카메라의 광축이며 화상의 평면은 광축의 중심으로부터 거리 F 만큼 떨어져 있고 xc1-yc1면 혹은 xc2-yc2면에 평행하다. 카메라의 파라미터는 초점거리, 화상중심 등의 내부 파라미터와 카메라의 위치 및 방향의 외부 파

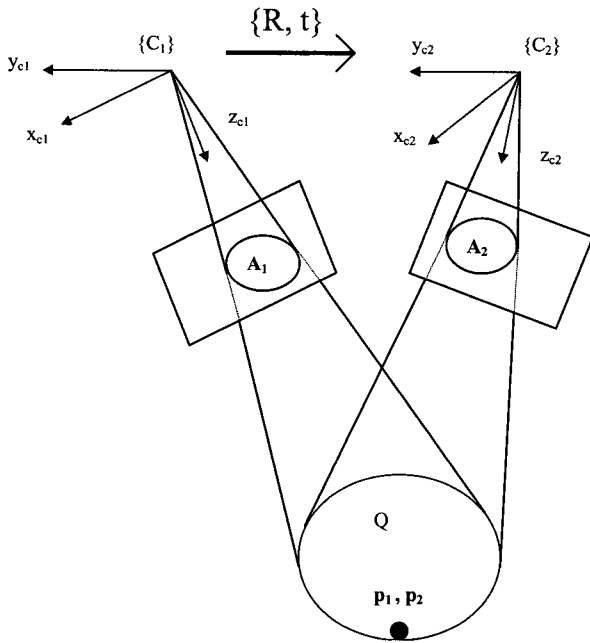


그림 2. 카메라의 자세에 대한 기하학적 구조.
Fig. 2. Geometric structure for camera posture.

라미터로 나타내어지며 이 중 내부 파라미터들은 점과 직선 대응을 이용하면 구할 수 있다[1]. 본 논문에서는 카메라의 내부 파라미터를 알고 있는 것으로 가정하고, 화상 좌표계를 카메라 좌표계로 변환을 통하여 원통 물체에 대한 카메라의 상대 위치를 구하고자 한다. 화상 좌표는 선형적인 핀홀 카메라 모델을 이용하여 나타내고 초점거리 F는 1로 설정하였다. 카메라 좌표계에서의 어떤 점을 화상 좌표 $u_i = [X_i \ Y_i \ 1]^T$ 로 투사 변환하는 식은 다음과 같다.

$$X_i = f \frac{x_{ci}}{z_{ci}} \quad i=1,2 \quad (11)$$

$$Y_i = f \frac{y_{ci}}{z_{ci}} \quad i=1,2 \quad (12)$$

여기서 X_i 와 Y_i 는 카메라의 화상 좌표 값이다.

공간상의 물체에 대하여 카메라의 투사모델과 카메라의 이동에 대한 기하구조를 살펴봄으로써 기준 좌표계, 카메라 좌표계, 화상 좌표계간의 관계를 알 수 있다.

2. 원형 물체와 화상간의 기하학적 구조

2차 방정식의 대표적인 특징이 원추 곡선이며 가장 중요한 원추 곡선은 타원, 원, 쌍곡선, 포물선이다. 본 논문에서는 로봇이 작업의 대상으로 물체의 평면이 원과 타원의 형상을 갖는 경우에 대해서만 기술한다. 그림 2에서 공간상에 원이 놓여 있는 평면을 p라 정의하고 기준 좌표계 {O}는 평면 p 위에서 정의되고, x_r 와 y_r 축은 이 평면 위에 놓여 있으며, z_r 축은 평면 p의 법선 방향의 벡터가 된다.

공간상에 놓여 있는 물체에 대하여 로봇이 이동하여 두 장의 화상을 취득할 경우 카메라의 좌표계 {C1}, {C2}와 물체 좌표계 {O}간의 변환관계는

$$p_{ci} = R_i p_r + t_i \quad i=1,2 \quad (13)$$

로 주어지고, 여기서 $i=1,2$ 는 두 장의 화상을 취득하는 카메라의 자세의 순서를 나타내고, (13)은 공간상의 어떤 점을 카메라 좌표계를 기준 좌표계로 나타내는 위치벡터로서 $p_{ci} = [x_{ci} \ y_{ci} \ z_{ci}]^T$, $p_r = [x_r \ y_r \ z_r]^T$ 이고, R_i 와 t_i 는 카메라 좌표계와 기준좌표계간의 회전행렬과 이동벡터를 나타낸다.

평면상의 어떤 점들은 $p_r = [x_r \ y_r \ 0]^T$ 로 나타내어지므로 이것을 위의 식에 대입하여 정리하면,

$$p_{ci} = G_i u_r \quad i=1,2 \quad (14)$$

이고, 여기서 G_i 는 회전행렬 중의 두 개의 열벡터와 위치벡터를 포함하는 3×3 행렬로서 $G_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ t_i]$ 로 정의되고, r_{i1} 과 r_{i2} 는 R_i 의 첫 번째와 두 번째 열벡터이며, $u_r = [x_r \ y_r \ 1]^T$ 는 물체 평면 위의 어떤 점에 대한 동차 벡터이다.

위의 식은 기준 좌표계와 카메라 좌표계간의 동차변환관계를 나타내며, 카메라의 투사변환 (11)과 (12)를 이용하여 카메라 좌표계를 화상좌표로 변환하면 (14)는 기준 좌표계와 화상좌표계간의 관계식으로 다음과 같이 주어진다.

$$z_{ci} u_i = G_i u_r \quad i=1,2 \quad (15)$$

위의 식에서 z_{ci} 는 카메라의 좌표계에서의 z축 값으로 수식전개과정에서 자연스럽게 소거되어진다.

공간의 평면상에 있는 원형 물체에 대한 곡선의 계수들을 원형변수 Q라 하고 (2)와 같이 동차좌표의 행렬식으로 나타내면

$$u_r^T Q u_r = 0 \quad (16)$$

로 표시되고, Q의 행렬의 값을 분석하면 곡선의 형태를 알 수 있다.

공간상의 원형 물체가 카메라에 투영되어 얻어진 화상으로부터 추출된 타원에 대하여 원형변수 A_i 와 화상 동차좌표로 나타내면

$$u_i^T A_i u_i = 0 \quad i=1,2 \quad (17)$$

로 표현되어지고, 위의 식은 화상타원의 2차 곡선식이고, A_1 과 A_2 는 화상처리를 통해 구할 수 있으므로 위의 식에 회전의 열 벡터와 위치벡터를 포함하는 (15)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$u_r^T G_i^T A_i G_i u_r = 0 \quad i=1,2 \quad (18)$$

물체와 화상간의 특징자의 대응에 있어서 그 성질이 변화하지 않는 곡선의 대응관계를 이용함으로써 화상에서의 타원을 나타내는 (18)을 실제 공간상의 물체의 형상을 기술하는 (16)과 동일하게 두면,

$$G_i^T A_i G_i = k_i Q \quad i=1,2 \quad (19)$$

로 나타낼 수 있으며, 이 식은 선형시스템을 기술하고

있다. 실제적으로 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = 0$ 및 $\mathbf{x}^T k_i \mathbf{A} \mathbf{x} = 0$ 는 같은 곡선을 나타내므로 k_i 는 스케일 인자라는 것을 알 수 있다.

위의 식은 물체의 곡선과 로봇의 이동에 따라 카메라에 투영된 두 개의 화상곡선간의 기본적인 기하학적인 구속조건을 나타낸다. 즉 이것은 물체곡선 Q와 화상곡선 A와의 관계에 있어서 투사변환 G가 존재함을 알 수 있다. 따라서 위의 식을 이용하여 G_i 를 구할 수 있다면 물체와 카메라간의 회전행렬 R_i 와 이동벡터 t_i 를 알 수 있다.

3. 물체와 카메라 좌표계간의 회전행렬 및 위치벡터 추정
 로봇의 핸드에 부착된 카메라의 내부 파라미터는 이미 보정되었다고 가정하고, 로봇의 이동에 의한 카메라의 두 관찰점에 대한 상대회전행렬과 상대위치벡터, R 과 t 는 로봇의 기구적 이동 변위로 직접 알 수 있다는 조건 하에서 두 번째 카메라의 회전행렬 및 위치벡터, R_2 과 t_2 를 추정한다. 이를 위하여 두 개의 화상에서 곡선의 대응 관계를 설정할 필요가 있으며, 이는 대수 행렬식 이론과 소거이론들을 이용하여 해결할 수 있다[12]. 3D에서 물체의 곡선은 화상의 원형 변수 A_1 과 카메라 중심 O_1 을 통해 지나가는 직선 z_{c1} 이 평면 p 와의 교차에 의해 유일하게 정의될 수 있다. 즉, 두 개의 화상에서 한 쌍의 2차 곡선이 주어지면 3D에서의 물체 곡선의 재 복구는 과결정계이고 나머지 정보는 이들의 대응을 설정하는데 사용되어질 수 있다.

본 연구에서는 화상의 대응 관계를 이용하여 직접적인 방법으로 물체와 카메라간의 회전행렬 및 위치벡터, R_2 와 t_2 를 구하는 방법을 제시한다. 공간상의 하나의 실제 물체에 대한 2차 곡선 Q에 대하여 하나의 카메라의 이동으로 두 개의 화상이 각각 다른 위치에서 취득되고, 이 취득된 화상에 대응하는 곡선을 각각 행렬 A_1 과 A_2 로 표시한다. (19)에 의하여, 실제 물체와 두 장의 화상간의 관계식은

$$G_1^T A_1 G_1 = k_1 Q \tag{20}$$

$$G_2^T A_2 G_2 = k_2 Q \tag{21}$$

로 표시된다. 여기서 $G_1 = [r_{11} \ r_{12} \ t_1]$, $G_2 = [r_{21} \ r_{22} \ t_2]$ 이고, r_{11} 및 r_{12} 와 r_{21} 및 r_{22} 는 각각 회전행렬 R_1 과 R_2 의 첫 번째, 두 번째의 열 벡터이고, t_1 과 t_2 는 물체와 첫 번째 및 두 번째 카메라 좌표계간의 이동벡터이다. 두 화상이 취득된 카메라의 좌표계간의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$R_2 = R R_1 \tag{22}$$

$$t_2 = R t_1 + t \tag{23}$$

주목할 사항은 R과 t의 값은 로봇의 이동에 의해 직접 주어지므로 R_1 과 t_1 을 구하면 R_2 와 t_2 는 직접 계산될 수 있다는 것이다.

기준 좌표계 {O}에서 물체 곡선 Q는 다음과 같이 표준 형태로 나타내어진다.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & q_{13} \\ 0 & q_{22} & 0 \\ q_{13} & 0 & q_{33} \end{bmatrix} \tag{24}$$

여기서 공간상에서 물체가 타원이면

$$q_{11} = \frac{1}{a^2}, \quad q_{22} = \frac{1}{b^2}, \quad q_{13} = 0, \quad q_{33} = -1 \tag{25}$$

로 주어진다. 행렬들이 모두 3×3 대칭 행렬이므로, (20)과 (21)은 12개의 구속 조건을 제공한다. 미지수의 개수는 R_1 과 t_1 에서의 6개와 k_1, k_2, q_{11}, q_{22} 를 합해서 모두 10개의 독립 미지수가 존재함을 알 수 있으며, 이런 변수들은 직접 12개의 식으로부터 적절히 소거과정을 거쳐 구해지게 될 것이다. 12개의 식으로 표시된 10개의 미지수로 구성된 연립방정식을 푸는 대신에 해석적으로 R_1 과 t_1 을 분리하고 회전행렬 R_1 을 독립적으로 구하는 방법에 대해서 기술한다. 우선, (20)과 (21)로부터 다음과 같은 부분 행렬식을 유도할 수 있다.

$$(R_1^T A_1 R_1)^{2 \times 2} = k_1 (Q)^{2 \times 2} \tag{26}$$

$$(R_2^T A_2 R_2)^{2 \times 2} = k_2 (Q)^{2 \times 2} \tag{27}$$

여기서 $(Q)^{2 \times 2}$ 는 행렬 Q의 좌측 위 부분의 2×2 부분행렬로 정의한다.

(27)의 회전행렬 R_2 에 (22)를 대입하여 두 개의 식을 정리하면 $(Q)^{2 \times 2}$ 가 소거되어 다음과 같이 주어진다.

$$[R_1^T (A_1 - k R^T A_2 R) R_1]^{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{28}$$

여기서 $k = k_1 / k_2$ 이다.

주목할 사항은 임의의 3×3 의 행렬 X의 좌측 위 부분의 2×2 행렬이 0 행렬이면 X의 행렬식, $\det(X) = 0$ 이 된다는 것이다. 따라서, 위 식으로부터

$$\det(A_1 - k R^T A_2 R) = 0 \tag{29}$$

로 주어진다. 이 식에서 k는 행렬 $(R^T A_2 R)^{-1} A_1$ 의 고유치가 됨을 알 수 있다.

이 고유치 k를 구하고 $C = A_1 - k R^T A_2 R$ 로 정의하면 (28)은 다음과 같이 주어진다.

$$[R_1^T C R_1]^{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{30}$$

위 식에서 양변의 행렬이 2×2 대칭이고, k를 구할 때 $\det(C) = 0$ 의 구속 조건을 사용하므로 위 식은 두 개의 독립식을 갖는다.

(30)과 (20)의 비교에서 $q_{12} = 0$ 의 관계식을 이용하면 R_1 을 구할 수 있다. 즉, (20)에서의 $q_{12} = 0$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$r_{11}^T A_1 r_{12} = q_{12} = 0 \tag{31}$$

(30)을 이용하여 R_1 의 해를 구하는 과정은 다음과 같이 정리된다.

우선, R_1 의 세 번째 열벡터(r_{13})를 구한다. 3×3 의 행

렬 C 의 $\det(C) = 0$ 이므로 C 의 고유치 중의 하나는 0과 같다. 따라서, C 의 3개의 고유치를 $\lambda_1, \lambda_2, 0$ 이라 두고 이에 대응하는 고유벡터를 s_1, s_2, s_3 라 정의하고 C 의 값을 고유벡터와 고유치로 분해하여 (30)에 대입하면 다음과 같은 두 개의 식이 얻어진다.

$$\lambda_1 (\mathbf{r}_{11}^T \mathbf{s}_1)^2 + \lambda_2 (\mathbf{r}_{11}^T \mathbf{s}_2)^2 = 0 \quad (32)$$

$$\lambda_1 (\mathbf{r}_{12}^T \mathbf{s}_1)^2 + \lambda_2 (\mathbf{r}_{12}^T \mathbf{s}_2)^2 = 0 \quad (33)$$

위 식을 R_1 의 열벡터와 정규직교벡터에 대하여 정리하면 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}_{11} (\sqrt{|\lambda_1|} \mathbf{s}_1 \pm \sqrt{|\lambda_2|} \mathbf{s}_2) = 0 \quad (34)$$

$$\mathbf{r}_{12} (\sqrt{|\lambda_1|} \mathbf{s}_1 \pm \sqrt{|\lambda_2|} \mathbf{s}_2) = 0 \quad (35)$$

여기서

$$\mathbf{s} = (\sqrt{|\lambda_1|} \mathbf{s}_1 \pm \sqrt{|\lambda_2|} \mathbf{s}_2)$$

로 정의하고, R_1 의 세 개의 열벡터와 벡터 s 의 직교 관계를 나타내면 그림 3과 같다.

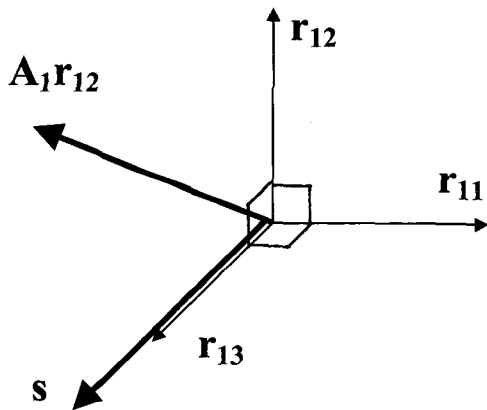


그림 3. R_1 의 열벡터와 벡터 s 의 직교성.
Fig. 3. The orthogonality of the R_1 's column vectors and vector s .

그림 3으로부터 벡터 s 는 r_{11} 및 r_{12} 에 직교하므로 벡터 r_{13} 에 나란함을 알 수 있다. 따라서 벡터 s 를 다음과 같이 정규직교화하면 r_{13} 를 구할 수 있다. 여기서 r_{13} 는 0이 아닌 C 의 2개의 고유치 λ_1 및 λ_2 와 고유벡터 s_1 및 s_2 로 나타내어진다.

$$\mathbf{r}_{13} = \pm \text{norm}[(\sqrt{|\lambda_1|} \mathbf{s}_1 \pm \sqrt{|\lambda_2|} \mathbf{s}_2)] \quad (36)$$

여기서 $\text{norm}(x)$ 는 벡터 x 의 정규벡터(normalized vector)를 나타낸다.

이제, R_1 의 첫 번째와 두 번째의 열벡터, r_{11} 과 r_{12} 를 구한다. (31)으로부터 벡터 $A_1 r_{12}$ 가 r_{11} 에 직교하는 것을 알 수 있다. 그림 3으로부터 r_{13} 및 r_{12} 가 r_{11} 에 직교하므로 세 개의 벡터 r_{12}, r_{13} 및 $A_1 r_{12}$ 가 같은 평면 위에 놓여 있게 된다. 따라서 벡터 $A_1 r_{12}$ 를 r_{12} 와 r_{13} 의 선형 결합으

로 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12} = c_1 \mathbf{r}_{12} + c_2 \mathbf{r}_{13} \quad (37)$$

위 식의 양변에 r_{12}^T 나 r_{13}^T 를 곱하면 $c_1 = r_{12}^T A_1 r_{12}$ 와 $c_2 = r_{13}^T A_1 r_{12}$ 로 구해지며, 위 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12} = (r_{12}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12}) \mathbf{r}_{12} + (r_{13}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12}) \mathbf{r}_{13} \quad (38)$$

(38)의 우변 둘째 항은 $(r_{13}^T A_1 r_{12}) r_{13} = (r_{13} r_{13}^T) A_1 r_{12}$ 로 되므로 (38)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H} \mathbf{r}_{12} = (r_{12}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12}) \mathbf{r}_{12} \quad (39)$$

여기서 $\mathbf{H} = \mathbf{A}_1 - r_{13} r_{13}^T \mathbf{A}_1$ 로 정의된다.

(20)의 $r_{12}^T A_1 r_{11} = q_{21}$ 에서 q_{21} 이 0이므로 위와 같은 방법으로 유도하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{H} \mathbf{r}_{11} = (r_{11}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{11}) \mathbf{r}_{11} \quad (40)$$

(39)과 (40)으로부터 r_{11} 및 r_{12} 가 행렬 \mathbf{H} 에 대한 두 개의 고유벡터인 것을 알 수 있으며 행렬 \mathbf{H} 의 고유벡터에 해당하는 고유치는 $\lambda_{h1} = r_{11}^T A_1 r_{11}$ 와 $\lambda_{h2} = r_{12}^T A_1 r_{12}$ 이다.

따라서 R_1 의 첫 번째, 두 번째의 열 벡터 r_{11} 과 r_{12} 는 3D에서 물체 2차 곡선이 타원이면 \mathbf{H} 의 고유치의 값이 0이 아닌 두 개의 고유치에 대응하는 \mathbf{H} 의 두 개의 고유벡터로 구해진다. $\det(\mathbf{H}) = 0$ 이므로 \mathbf{H} 는 0의 고유치를 갖는 세 번째 고유벡터로 r_{13} 를 가질게 될 것이며 이는 r_{11} 과 r_{12} 와 직교하지 않는다.

따라서 행렬 \mathbf{H} 로부터 행렬 R_1 의 r_{11} 과 r_{12} 를 계산할 수 있으며 행렬 \mathbf{H} 의 고유치를 분석하면 공간상에서의 2차 곡선의 형태를 분류할 수 있다. 행렬 \mathbf{H} 의 값이 대칭 행렬이 아니면 r_{11} 과 r_{12} 의 실 해를 항상 구할 수 없는 경우도 있으며 이러한 경우는 A_1 과 A_2 가 대응하지 않는 경우에 발생한다.

이상과 같이 로봇의 첫 번째 이동에 의하여 물체와 카메라간의 회전변환 R_1 을 구할 수 있으며, 로봇이 두 번째로 이동한 관찰점의 회전변환 R_2 는 로봇의 제어로 카메라의 이동 파라미터 R 과 t 를 알 수 있으므로 (22)를 이용하여 구할 수 있다.

로봇이 두 번째로 이동한 위치, t_2 를 구하기 위해서는 t_1 을 먼저 구하여야 한다. 공간상의 물체 곡선이 타원인 경우 (20)에서 $q_{31}=0, q_{32}=0$ 이고, (21)에서 $q_{31}=0$ 이므로 각각은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{t}_1^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{11} = 0, \mathbf{t}_1^T \mathbf{A}_1 \mathbf{r}_{12} = 0, \mathbf{t}_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{r}_{21} = 0 \quad (41)$$

위 식의 마지막 식에서 t_2 는 (23)에 의해 t_1 로 변환되므로 세 개의 선형식을 이용하여 $t_1 = [t_{x1} \ t_{y1} \ t_{z1}]^T$ 의 값을 구할 수 있다. t_1 이 구해지고 나면 (23)을 이용하여 $t_2 = [t_{x2} \ t_{y2} \ t_{z2}]^T$ 를 직접 구할 수 있다. 물체로부터의 카메라의 최종 자세인 t_2 및 R_2 를 구하기 위한 과정들을 정리하면 (36)과 (39) 및 (40)을 이용하여 R_1 를 구하고, (22)을 이용하여 R_2 를 구한다. (41)을 이용하여 t_1 을 계산

하고, (23)을 이용하여 t_2 를 계산한다.

이상으로 로봇에 카메라를 부착하여 로봇이 이동하는 동안 두 개의 화상을 얻어 공간상의 물체로부터의 카메라의 위치 및 회전에 대한 파라미터, t_2 및 R_2 를 구할 수 있음을 살펴보았다. 물체의 위치를 기준으로 두 개의 화상을 취득하는 순간의 카메라의 위치를 상대적으로 구한 것이므로 이 카메라의 위치는 로봇의 작용점의 위치, 베이스의 위치와 고정된 관계 혹은 알려진 관계로 유지되므로 로봇의 자세 보정을 위하여서도 본 기법이 활용될 수 있음을 보여준다.

IV. 카메라의 자세 측정 실험

제안된 카메라 자세의 능동 측정에 대하여 공간상의 원과 카메라에 투영된 화상 원 간의 대응 관계를 이용하여 카메라의 자세를 구하는 방법에 대한 수치적 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 카메라는 삼성 SFA-410ED CCD 카메라로 화소수는 768×494 , 촬상면적은 $6.54\text{mm} \times 4.89\text{mm}$, d_x 와 d_y 는 각각 0.0085mm , 0.0098mm 이고 초점거리가 16mm 인 렌즈를 사용하였으며, 화상 처리는 고속의 32bit DSP 칩(TMS320C30)을 내장하고 해상도가 640×480 인 삼성전자 FARA MVB-02 화상 처리 전용 보드를 이용하였다. 실험에 이용된 원형 물체의 크기는 반지름이 2cm 이고 물체의 중심 좌표는 기준 좌표계의 중심에 두었다.

모든 실험들은 공간상에 있는 원이나 타원으로부터 카메라 좌표계, $\{C_1\}$ 에서 첫 번째 화상을 얻은 후 회전 변환 R만큼 회전하고 평행이동 t만큼 이동하여 카메라 좌표계, $\{C_2\}$ 에서 두 번째 화상을 얻었다. 두 카메라 좌표계간의 관계를 나타내는 카메라의 운동 파라미터, R 및 t는 로봇의 끝점의 운동으로부터 계산되어 질 수 있다. 두 개의 화상으로부터 물체 곡선이 추출되면 각각에 대한 화상 변수 A_1 과 A_2 를 추정한다. 카메라의 이동에 따른 회전과 위치를 로봇의 제어를 통해 알 수 있으므로 이 값을 이용하여 카메라와 물체간의 관계를 정의할 수 있는 자세 보정 변수(R_2, t_2)들을 계산한다.

본 논문에서 실험의 목적은 원형 물체로부터 떨어져 있는 카메라의 회전각과 위치를 정확하게 추정하기 위한 것으로 카메라가 임의의 운동을 할 때의 데이터들을 분석하여 실험의 입력 데이터로 사용하였으며 이를 가지고 카메라의 자세의 보정을 수행하여 매개변수들을 구한 값과 실제 값을 비교하였다. 본 실험에서 추정된 카메라의 상대 위치와 상대 회전각을 각각 표 1, 표 2에 나타내었다.

표 1은 카메라를 물체로부터 $[0 \ 0 \ 50]\text{cm}$ 에 초기 설정하고 난 후 카메라를 x_c 축을 기준으로 회전하면서 x_c, y_c 및 z_c 축 방향으로 이동하여 계산한 카메라의 위치에 대한 기준값, 계산값 및 오차를 나타낸 것이다. 여기서 오차는 물체 좌표계와 카메라 좌표계간의 거리에 대한 상대오차를 나타낸 것이다. 두 개의 화상을 취득하면서 첫 번째 화상은 카메라 x_c 축의 회전각을 10.0° 로, 위치값을 $[0 \ 0 \ 50]\text{cm}$ 로 고정하여 얻었으며 두 번째 화상은 회전각과 위치값을 변화시키면서 얻었다. 이때 회전각이 클

표 1. 카메라 위치에 대한 계산값과 상대오차.

Table 1. Computed values and % error of camera position.

회전 각($^\circ$)	기 준(cm) (x,y,z)	계 산(cm) (x,y,z)	오 차 (%)
0.10	10.0, -30.4, 50.5	10.08, -30.85, 50.30	1.30
0.15	15.0, -20.0, 45.5	15.12, -20.16, 46.18	1.03
0.25	15.0, -25.0, 40.0	15.08, -25.20, 40.52	0.87
1.00	15.0, -20.6, 35.5	15.06, -20.78, 35.86	0.77
1.50	15.0, -10.3, 30.0	15.08, -10.38, 30.30	0.77
평균			0.94

표 2. 카메라 회전각에 대한 계산값과 상대오차.

Table 2. Computed values and % error of camera rotation angles.

횟수	기준 회전각($^\circ$) (R_x, R_y, R_z)	계산 회전각($^\circ$) (R_x, R_y, R_z)	오차 (%)
1	-5.00, 0.0, 0.0	5.05, 0.0, 0.0	0.90
2	-15.0, 0.0, 0.0	-15.17, 0.0, 0.0	1.13
3	-25.0, 0.0, 0.0	-25.30, 0.0, 0.0	1.20
4	0.0, -15.0, 0.0	0.0, -15.18, 0.0	1.20
5	0.0, -25.0, 0.0	0.0, -25.33, 0.0	1.32
평균			1.15

표 3. 타원형 계수 값의 추정.

Table 3. Estimated value for elliptical parameters.

계수 행렬	회전 ($^\circ$)	a	b	c	d	e
Q		0.25	0	0.25	0	0
A1		1428.6	0	1428.6	0	-42.9
A2	$R_x -15$	1428.6	0	1509.4	0	-44.7
	$R_x -25$	1428.6	0	1702.7	0	-47.9
	$R_y -15$	1533.7	11.6	1428.6	-0.3	-42.9
	$R_y -25$	1748.4	20.3	1428.6	-0.5	-42.9

수록 물체가 화면의 중심에서 벗어나 두 카메라의 광축이 물체의 평면에서 정확하게 일치하지 않음으로 인하여 오차가 증가하는 원인이 되었다.

표 2는 공간상의 평면에 있는 원에 대해 카메라를 회전하였을 경우 카메라의 회전각에 대한 계산값을 나타낸 것이다. 물체로부터 카메라는 $[0 \ 0 \ 50]\text{cm}$ 에 초기 설정하였으며 첫 번째 화상은 $[0 \ 1.5 \ 50]\text{cm}$ 로 고정하고 두 번째 화상은 카메라를 x_c 축과 y_c 축 방향으로 각각 회전하면서 화상을 얻었다. 이 표의 결과에서 알 수 있듯이 회전각이 클수록 두 카메라의 광축이 물체에 주시하는 정도가 벗어나 오차가 증가하는 원인이 되므로 스테레오 구성으로 화상이 취득되는 방법이 요구된다.

표 3은 표 2의 실험에 사용된 카메라의 회전각에 따라 변화되는 공간상에 있는 원판에 대한 계수(Q)와 카메라가 이동에 의해 얻어진 첫 번째 화상에 대한 계수(A_1), 두 번째 화상에 대한 계수(A_{12})를 추정한 값을 나타낸 것이다.

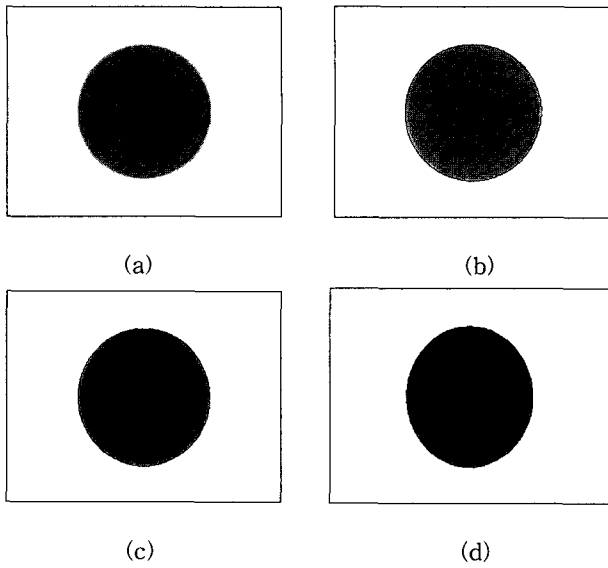


그림 4. y_c 축을 중심으로 회전한 화상 곡선의 타원 에지 (a) 원형 물체의 화상. (b) 0° 회전 (c) 15° 회전 (d) 25° 회전

Fig. 4. Elliptical edge of the images rotated along the y_c axis. (a) the image of (b) 0° rotation. circular object (c) 15° rotation (d) 25° rotation

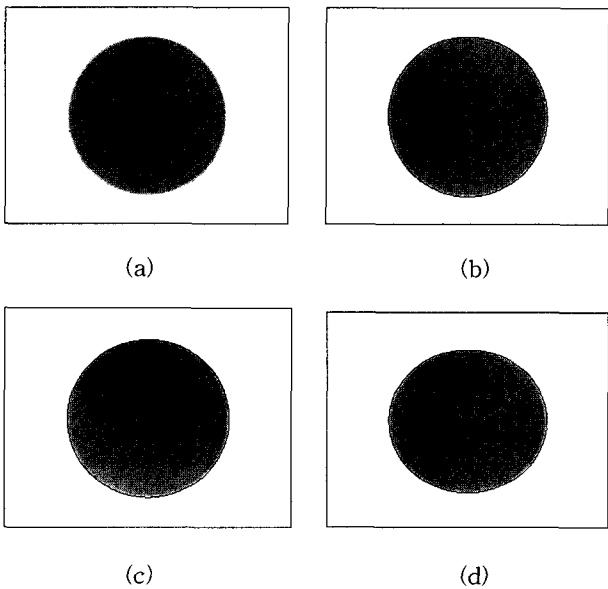


그림 5. x_c 축을 중심으로 회전한 화상 곡선의 타원 에지. (a) 원형 물체의 화상 (b) 0° 회전 (c) 15° 회전 (d) 25° 회전

Fig. 5. Elliptical edge of the image rotated along the x_c axis. (a) an image of degree rotation (b) image with 0 circular object (c) image with 15 degrees rotation (d) image with 25 degrees rotation

그림 4와 그림 5는 표 2의 실험에 사용된 평면 원의 화상과 카메라를 회전한 경우를 나타낸 것이다. 그림 4에서 (a)는 실험에 사용된 평면 원의 원래 화상을 나타

표 4. 원기둥에 대한 카메라의 추정된 위치값과 상대오차.

Table 4. Estimated position values and %error of camera for cylinder.

회전 각($^\circ$)	측정 값(cm) (x,y,z)	추정값(cm) (x,y,z)	오차 (%)
35	18.19, 0.2, 50	17.981, 0.197, 49.150	1.63
30	23.31, 0.1, 50	23.009, 0.099, 49.375	1.17
25	28.86, 0.1, 50	28.611, 0.099, 49.500	1.01
20	35.01, 0.1, 50	34.667, 0.099, 49.525	0.97
평균			1.19

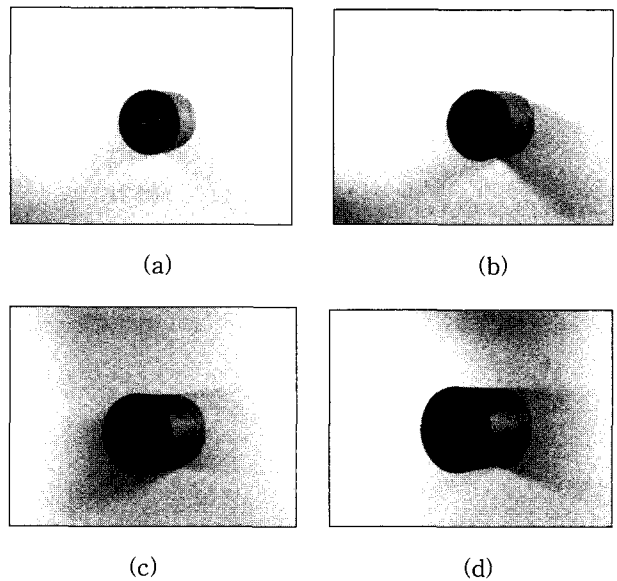


그림 6. y_c 축을 중심으로 회전한 원기둥의 화상: (a) 160° , (b) 155° , (c) 150° , (d) 145° .

Fig. 6. The image of cylinder rotated along the y_c axis. (a) 160° , (b) 155° , (c) 150° , (d) 145° .

내며, 이 화상의 에지를 추출한 화상이 그림 4의 (b)이다. 그림 4의 (c)와 (d)는 원형 물체의 중심이 카메라의 중심에 오도록 하면서 카메라를 y_c 축을 중심으로 15° , 25° 회전하여 취득한 화상을 나타낸 것이다. 그림 5에서는 카메라를 x_c 축을 중심으로 회전하면서 화상을 획득하여 나타낸 것이다.

본 논문에서 제안하는 능동 캘리브레이션의 기법을 실제 환경에서 원 기둥 물체에 적용하여 실험하였다. 원 기둥의 물체에 대하여 카메라를 y_c 축 방향을 기준으로 회전하면서 회전방향의 각도에 대하여 카메라의 위치를 이동하여 자세를 측정된 값을 표 4에 나타내었다. 카메라의 광축이 물체에 수직으로 화상중심이 카메라의 중심에 오도록 주시한 후에 첫 번째 화상을 취득하고 물체로부터 카메라를 [0 0 50]으로 이동한 후 두번째 화상은 y_c 축을 중심으로 주어진 각 만큼 회전하고 x_c 축을 따라 측정값만큼 이동하여 화상을 취득하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 로봇/카메라가 제어될 때 카메라의 회전각이

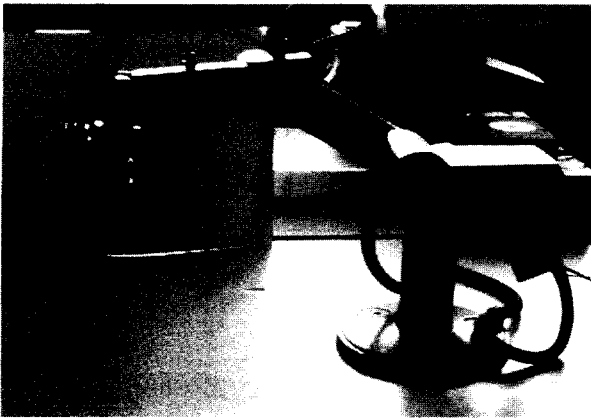


그림 7. 카메라를 부착한 작업용 로봇.
Fig 7. Task robot with a camera.

클수록 두 카메라 좌표계간의 이동벡터가 커서 오차가 증가하는 원인이 되므로 로봇의 핸드를 회전할 경우 연속적인 두 화상을 취득할 수 있도록 미세한 회전이 요구된다. 그림 6은 표 4의 실험에 사용한 원기둥의 실제 화상과 카메라가 회전한 각각의 경우들에 대하여 원기둥의 화상을 나타낸 것이다.

본 실험에 사용된 카메라가 설치된 작업로봇을 그림 7에 보였다. 이 실험에서 카메라를 고정하는 지그의 위치 오차에 의해 회전각을 계산할 때 오차가 커지는 원인이 되므로, 카메라 지그부의 높은 위치 정도가 요구된다.

한편 카메라가 원형을 수직으로 주시하고 있을 때 카메라가 광축 즉, z_c 축을 중심으로 회전하는 경우에는 화상에 투영된 원의 특징자가 동일하므로 원형 계수행렬이 변하지 않아 해를 구할 수가 없다. 따라서 실험에서 카메라의 화상면과 평면상의 원이 나란하지 않도록 실험을 수행하였다.

본 연구에 선행하여 자체적으로 설계 및 제작된 이동/작업 로봇을 제어함에 있어 작업로봇이 작업하는 동안에 특이자세를 해소하기 위하여 작업로봇의 기저를 적절한 위치로 이동하는 과정에 이동로봇은 차륜에 의해 이동되므로 지표면 등 환경의 불확실성으로 인하여 위치오차가 발생하는데 직선의 이동에 의한 동적제어의 실험에서 약 5% 정도의 오차가 발생하였다[1]. 카메라의 보정을 통해 물체로부터 카메라의 자세를 인식할 경우 약 2%이내의 오차가 발생하였으므로 작업로봇의 기구가 보다 정확한 값을 지니고 있다면 이동로봇의 위치오차에 비하여 보다 정확도가 개선되어 지므로 이동로봇을 정밀하게 제어되거나 작업 환경에서 능동적으로 위치를 보상하는데 응용되어 질 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 조립 대상물체의 정보 즉, 2차 곡선의 특징 중 원형 형태를 갖는 물체의 영상을 이용하여 카메라의 자세 보정을 능동적으로 수행할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 능동보정 방법은 로봇이 원판을 대상으로 작업하는 경우 단일 카메라의 운동으로 취득된 두 장의 화상으로부터 나오는 두 개의 원형 변수의 대응 관

계를 이용하여 카메라의 자세를 추정하는 기법이다. 회전변환을 구하는 실험으로 공간상에 고정되어 있는 원판형의 물체에 대하여 카메라 좌표계의 x 축 또는 y 축을 중심으로 카메라를 회전시킨 후 영상을 취득하여 실제 회전값을 추정하는 정도를 확인하였으며, 이동벡터를 구하는 실험으로는 카메라 좌표계의 z 축을 중심으로 카메라를 회전시키면서 x 축 또는 y 축 방향으로 이동한 후 영상을 취득하여 이동벡터를 추정함에 있어서의 정도를 확인하였다. 그 결과, 물체의 정보를 이용하지 않고 화상의 원형 특징자를 이용하여 카메라의 상대회전변환과 이동벡터를 구할 수 있으며, 불확실성을 포함하고 있는 이동/작업 로봇의 정확도를 개선할 수 있으며 작업 환경에서 능동적으로 위치를 보상하는데 응용되어 질 수 있다.

연속적인 두 개의 영상 프레임을 효율적으로 사용하여 상대회전변환과 이동벡터를 상황변화에 적응하면서 정밀하게 구하는 방법에 대하여 지속적인 연구가 요구되어진다.

참고문헌

- [1] 한만용, 이장명, "비전 정보를 이용한 이동/작업용 로봇의 정밀 제어," 대한전자공학회 논문집, vol. 34, no. 10, pp. 71-79, 1997.
- [2] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 323-344, Aug. 1987.
- [3] C. Chen and Y. F. Zheng, "A new robotic hand/eye calibration method by active viewing of a checkerboard pattern," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 770-775, 1993.
- [4] S. J. Maybank, "A theory of self-calibration of a moving camera," *Int. Journal of Computer Vision*, vol. 8, no. 2, pp. 123-151, 1992.
- [5] D. J. Bennett, Davi Geiger and J. M. Hollerbach, "Autonomous robot calibration for hand-eye coordination," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 5, pp. 550-559, 1991.
- [6] G. Q. Wei, K. Arbter and G. Hirzinger, "Active self-calibration of robotic eyes, hand-eye relationships with model identification," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 14, no. 1, pp. 158-166, 1998.
- [7] D. J. Bennett and J. M. Hollerbach, "Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive joints," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 7, no. 5, pp. 597-606, 1991.
- [8] Q. T. Luong and O. D. Faugeras, "Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices," *Int. Journal of Computer Vision*, vol. 22, no. 3, pp. 261-289, 1997.
- [9] Y. Lui, T. S. Huang and O. D. Faugeras,

"determination of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondences," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 1, pp. 28-37, 1990.

- [10] R. Safaei-Rad, I. Rchoukanov, B. Benhabib, and K. C. Smith, "Accurate parameter estimation of quadratic curves from grey-level images," *Comput. Vis. Graph. Image Processing*, vol. 54, no. 2, pp. 259-274, 1991.
- [11] R. K. Lenz and R. Y. Tsai, "Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology,"

Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 68-75, 1987.

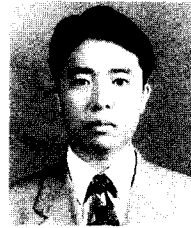
- [12] R. M. Haralick, "Solving camera parameters from the perspective projection of a parameterized," *Pattern Recognition*, vol. 17, no. 6, pp. 637-645, 1984.
- [13] S. D. Ma, S. H. Si and Z. Y. Chen, "Quadric curve based stereo," *Proc. 11th Int. Conf. Patt. Recog.*, vol. 1, pp. 1-4, 1992.
- [14] J. G. Semple and G. T. Kneebone, *Algebraic Projective Geometry*, Clarendon Press:Oxford, 1952 (reprinted 1979).



한만용

1986년 2월 부산공업대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1999년 2월 부산대학교 대학원 공학박사학위 취득. 현재 부산교통공단 기전처 신호통신부. 주관심분야는 로봇/카메라 시스템 설계 및 제어, ticket & card 제어.

야는 로봇/카메라 시스템 설계 및 제어, ticket & card 제어.



김병화

1972년 8월 27일생. 1997년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1999년 2월 부산대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 부산대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야는 로봇비전, 카메라보정, 로봇제어, 센서계측.

센서계측.



김국현

1957년 3월 28일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987-1988 영국 Oxford 대학교 Self-Tuning Lab. post doctor.

'89. 4 한국전기연구소 입소. 현재 한국전기연구소 책임연구원(발전제어사업팀장).



이장명

1957년 11월 22일생. 1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1990년 12월 USC(남가주대학) 공학박사학위 취득 (Computer Engineering 전공). 현재 부산대학교 전자공학과 부교수, 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장. 주관심 분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어, μ -processor 응용 시스템 설계, motor 구동방식 및 제어.

부산대학교 전자공학과 부교수, 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장. 주관심 분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어, μ -processor 응용 시스템 설계, motor 구동방식 및 제어.