

애자 영상을 이용한 카메라 보정

김 창 회, 정 승 호, 정 태 원
한국원자력연구원 원자력로봇팀, *충남대학교 전기공학과

Camera Calibration Using the Image of a Pin Type Insulator

Changhoi Kim, Seungho Jeong, Taewon Jeong*
Korea Atomic Energy Research Institute Nuclear Robotics Lab. *Chungnam National University Electrical Engineering Division

Abstract - 활선차량의 붐 끝단에 탑재되어 있는 로봇의 기준좌표계는 활선차량의 접근 위치와 붐의 확장 길이 및 각도에 따라 달라지므로 작업대상물과 로봇 사이의 상대 위치를 찾아내어 설정된 작업 경로를 보정하여야만 한다. 본 논문에서는 작업대상물인 애자 영상으로부터 카메라를 보정하는 기법을 제시하여 활선작업 차량의 붐 끝단에 장착된 로봇의 위치 및 자세를 측정할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 핀홀 카메라 모델을 적용하였으며 원기둥 형태의 애자 영상으로부터 카메라 내부 파라미터 및 외부 파라미터를 추출하였다. 제시된 기법은 시뮬레이션을 통하여 효용성을 입증하였다.

1. 서 론

활선작업은 무정전 상태에서 전력선을 유지보수하기 위한 작업방법으로서, 국내 배전선로의 유지보수는 대부분 활선 상태에서 작업을 수행하고 있다. 이러한 활선공법은 편리하고 작업시간이 짧게 소요되는 장점이 있는 반면, 적지 않게 안전사고가 발생하고 있으며, 매년 약 800 건 이상의 감전사고가 발생하여 100여명이 사망하고 있다[1]. 우리나라의 사회 구조가 선진국형으로 변화되면서 위험 업종에 대한 기피 현상이 점점 심화되고 있으며 인구의 노령화로 인하여 숙련된 작업자의 확보가 점점 어려워질 전망이다. 선진 외국의 경우 작업의 위험성 탈피, 전공인력 감소에 대한 대처, 경제성 확보 등의 목적으로 활선작업을 수행하기 위한 로봇을 개발하였으며, 일본의 경우에는 일부 현장에서 활용하고 있는 것으로 보고되고 있다[2].

배전선로 활선작업용 로봇은 활선 차량의 붐(boom) 끝단에 설치된다. 따라서 활선차량의 접근위치에 따라 로봇 베이스의 위치가 달라지며, 작업 현장에 따라 작업대상물의 위치가 다르게 설치되어 있을 수가 있다. 이러한 작업환경에 로봇을 활용하기 위해서는 로봇의 자세 및 위치를 측정하여 보정해 주어 설정된 로봇의 작업 경로를 변경할 수 있어야 한다. 로봇의 자세 및 위치를 보정하는 방법으로는 스테레오 카메라를 이용하여 각 카메라 영상의 차이를 이용하거나, 레이저 센서와 영상센서를 이용하여 회전 및 거리 정보를 추출하여 위치를 추정하는 방법 등이 사용된다[3,4].

영상으로부터 정량적인 로봇의 위치 및 자세 정보를 추정하기 위해서는 카메라의 내/외부 파라미터에 대한 보정이 필요하다. 배전선로의 핀 애자는 그림 1에서 보는 바와 같이 다수의 원판이 존재하고 애자 형상에 대한 치수는 사전에 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 원판의 영상을 이용하여 카메라의 내/외부 파라미터를 보정하였다.

2. 본 론



<그림 1> 핀애자 영상

2.1 카메라 모델

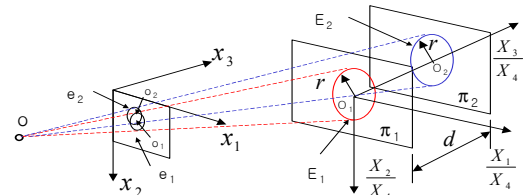
본 논문에서는 식(1)과 같이 렌즈의 왜곡이 없는 핀홀 카메라 모델을 사용하여 카메라를 보정하였다.

$$s \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & c_1 \\ 0 & f_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = K [R|t] \tilde{X} \quad (1)$$

여기에서 $x = [x_1, x_2, 1]$ 는 영상 등차 좌표이며 s 는 비례 계수(scale factor), f_1, f_2 는 각각 가로, 세로 방향의 초점 거리, c_1, c_2 는 각각 가로, 세로 방향의 픽셀단위 영상 중심 좌표이며, 행렬 R 은 회전 행렬, t 는 병진 운동 벡터, $\tilde{X} = [X_1, X_2, X_3, X_4]$ 는 절대 좌표계상 임의점의 등차 좌표이다.

2.2 카메라 내부 파라미터 보정

그림 2에서와 같이 애자의 원판 E_1, E_2 는 영상 좌표계에서 타원 e_1, e_2 로 투영된다. 애자의 원형중심 E_1, E_2 는 식 (2)와 같이 표현된다.



<그림 2> 애자 영상의 2차원 투영

$$\begin{aligned} E_1 : X_1^2 + X_2^2 &= r^2, X_3 = 0, X_4 = 1 \\ E_2 : X_1^2 + X_2^2 &= r^2, X_3 = d, X_4 = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

또한 식(2)는 다음과 같이 행렬식으로 표현 된다.

$$\begin{aligned} E_1 : \bar{X}^T \tilde{C}_1 \bar{X} &= 0, X_3 = 0, X_4 = 1 \\ E_2 : \bar{X}^T \tilde{C}_2 \bar{X} &= 0, X_3 = d, X_4 = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tilde{C}_1 \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 \end{bmatrix}, \tilde{C}_2 \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 \end{bmatrix}, \bar{X} \equiv \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

두 평면 π_1, π_2 와 영상 평면간의 투영 행렬을 각각 P_1, P_2 라 할 때 각 원상에 있는 점 \bar{X} 의 영상 평면에서의 투영 점 x 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 투영된 타원 e_1, e_2 는 식(5)와 같이 행렬식으로 표현된다.

$$s_1 x = P_1 \bar{X} = K Q_1 \bar{X}, \quad s_2 x = P_2 \bar{X} = K Q_2 \bar{X} \quad (4)$$

$$Q_1 \equiv \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix}, \quad Q_2 \equiv \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13}d + t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23}d + t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33}d + t_3 \end{bmatrix}$$

$$x^T \tilde{e}_1 x = 0, \quad \tilde{e}_1 = P_1^{-T} \tilde{C}_1 P_1^{-1} = K^{-T} Q_1^{-T} \tilde{C}_1 Q_1^{-1} K^{-1} \quad (5)$$

$$x^T \tilde{e}_2 x = 0, \quad \tilde{e}_2 = P_2^{-T} \tilde{C}_2 P_2^{-1} = K^{-T} Q_2^{-T} \tilde{C}_2 Q_2^{-1} K^{-1}$$

평면상에서 모든 원과 무한직선과의 교차점인 circular point는 무한평면상에 있는 반경이 0 으로 식(6)으로 정의되는 absolute conic Ω 상에 존재한다.

$$X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 = 0, X_4 = 0 \quad (6)$$

Absolute Conic의 투영 영상을 $\tilde{\omega}$ 라 할 때, $\tilde{\omega}$ 는 다음과 같은 식을 만족시키는 점들로 구성되어 있다.

$$x^T \tilde{\omega} x = 0, \tilde{\omega} \equiv P_{\infty}^{-T} \tilde{\Omega} P_{\infty}^{-1} = K^{-T} R^{-T} I R^{-1} K^{-1} = K^{-T} K^{-1} \quad (7)$$

식(7)로부터 대칭 행렬인 $\tilde{\omega}$ 는 R, t 와는 관계없이 카메라 내부 파라미터 행렬 K 에 의해서 결정됨을 알 수 있으며, 영상으로부터 Absolute Conic의 투영 영상 $\tilde{\omega}$ 를 알 경우 카메라 내부 파라미터들을 구할 수 있다.

평면상에 2개의 원은 2개의 circular point Z_1, Z_2 를 교차하며 가지며 Z_1, Z_2 의 영상 투영 점을 각각 z_1, z_2 라 할 때, z_1, z_2 는 Absolute Conic의 투영 영상인 $\tilde{\omega}$ 상에 있으므로 식(9)를 만족시켜야 한다.

$$z_1^T K^{-T} K^{-1} z_1 = 0 \rightarrow z_1^T \tilde{\omega} z_1 = 0 \quad (9)$$

$$z_2^T K^{-T} K^{-1} z_2 = 0 \rightarrow z_2^T \tilde{\omega} z_2 = 0$$

무한 직선 $L_{12\infty}$ 을 영상 평면에 투영한 무한 소실 직선 $l_{12\infty}$ 는 식(10)을 만족시키는 점 p_{∞} 로 구성된다.

$$p_{\infty} = K [R|t] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X_1 r_{11} + X_2 r_{12} \\ X_1 r_{21} + X_2 r_{22} \\ X_1 r_{31} + X_2 r_{32} \end{bmatrix} \quad (10)$$

X_3 축 상의 무한 점 $V_{3\infty}$ 의 투영점인 무한 소실점 $v_{3\infty}$ 는 p_{∞} 는 식(11)을 만족한다.

$$P_{\infty}^T K^{-T} K^{-1} v_{3\infty} = [X_1 r_{11} + X_2 r_{12}, X_1 r_{21} + X_2 r_{22}, X_1 r_{31} + X_2 r_{32}] \begin{bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{bmatrix} = 0$$

$$\rightarrow P_{\infty}^T \tilde{\omega} v_{3\infty} = 0 \quad (11)$$

그림 3은 2개의 원 E_1, E_2 로 구성된 원통형 물체와 그 내부 영상을 나타낸다. 무한 소실 직선 $l_{12\infty}$ 상의 점을 p_{∞} 라 하고 타원 영상 e_1, e_2 에 해당하는 행렬을 각각 \tilde{e}_1, \tilde{e}_2 라 하자. 타원 e_1 에 대한 Polar line $\overline{a_1 b_1}$ 은 극점 p_{∞} 을 지나면서 타원 e_1 에 접하는 두 개의 직선 $\overline{p_{\infty} a_1}, \overline{p_{\infty} b_1}$ 과 타원 e_1 과의 교점인 점 a_1, b_1 을 지난다.

3차원 점 P_{∞}, A_1, B_1 이 p_{∞}, a_1, b_1 에 투영되었다고 할 때, 핀홀 카메라 모델에서 사용하는 Perspective Projection의 경우 점선 특성은 불변하므로 3차원 직선 $\overline{P_{\infty} A_1}, \overline{P_{\infty} B_1}$ 은 원 E_1 에 접하는 직선들임을 알 수 있다.

마찬가지로 원 E_2 상의 3차원 점 A_2, B_2 가 타원 e_2 상의 점 a_2, b_2 에 투영되었다고 할 때, 직선 $\overline{P_{\infty} A_2}, \overline{P_{\infty} B_2}$ 역시 원 E_2 에 접하는 직선들이며 직선 $\overline{A_1 A_2}, \overline{B_1 B_2}$ 는 X_3 축에 평행한 직선임을 알 수 있다. 따라서 다음 식과 같이 X_3 축 방향의 무한 점 $V_{3\infty}$ 의 영상점인 $v_{3\infty}$ 는 직선 $\overline{a_1 a_2}, \overline{b_1 b_2}$ 의 교점이다.

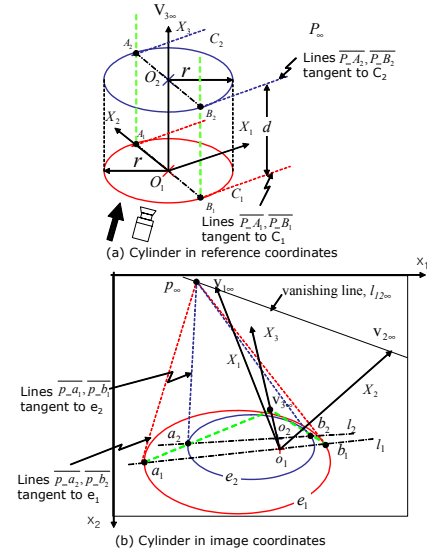
따라서 영상으로부터 허상점인 $z_1, z_2, v_{3\infty}$ 를 구할 경우 식(9)와 식(11)로부터 대칭 행렬인 $\tilde{\omega}$ 를 구할 수 있으며 내부 파라미터 f_1, f_2, c_1, c_2 를 구할 수 있다.

2.3 시뮬레이션

제시된 카메라 내부 파라미터 추정 기법의 유효성을 확인하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 임의의 주어진 파라미터를 이용하여 2개의 타원 영상을 생성시키고 그 영상으로부터 파라미터를 추정하였다. 표 1은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

시뮬레이션 결과 카메라 초점거리는 약 1.5 % 정도 오차가 발생하였으며, 외부파라미터 중 회전 성분은 약 0.4°, 위치 성분은

약 7 mm 정도의 오차가 발생함을 확인하였다.



<그림 3> 원통형 물체와 내부 영상

<표 1> 파라미터 추정 시뮬레이션 결과

설정 파라미터		시뮬레이션 결과			
f	r(x,y)	t(x,y,z)	f(x,y)	t(x,y)	t(x,y,z)
1000, 800	30, 5	200, 0, 1000	994, 796	30.3, 5.7,	216, 5, 992
1000, 800	60, -25	200, 0, 1000	998, 798	59.8, -24.7	213, -2, 997
1000, 800	60, 5	-100, 0, 1000	998, 799	60.3, 5.0	-104, -3, 998
700, 600	60, 5	-50, 100, 800	700, 600	60.0, 5.0	-51, 100, 800
700, 600	60, -3	-50, 100, 600	700, 599	60.0, -3.0	-51, 99, 599
700, 600	-20, -3	-50, 100, 600	689, 591	-20.1-3.1	-51, 99, 599

3. 결 론

본 논문에서는 활성작업 차량의 버켓 앞부분에 장착된 로봇의 위치 및 자세를 측정하기 위하여 애자 영상으로부터 카메라를 보정하는 기법을 제시하였다. 로봇과 작업대상물인 애자간의 상대 위치 및 자세 정보를 추출하기 위하여 렌즈의 비선형 왜곡이 없는 핀홀 카메라 모델을 적용하여 로봇에 장착된 작업 관측 카메라 영상으로부터 카메라 내부 파라미터 및 외부 파라미터를 추출하였다. 제시된 기법은 시뮬레이션을 통하여 효율성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전기안전공사, 2002 전기제해통계, pp.29-43, 2003
- [2] Keiichi Takaoka, et. al, "Development of the fully-Automatic Live-line Maintenance Robot-Phase III", Proc. of the 4th IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, Fukuoka Japan, 2001
- [3] J. P. Hespanha, Z. Dodds., G. D. Hager, A. S. Morse, "Decidability of robot positioning tasks using stereo vision systems", IEEE Conf. of Decision Control, vol. 4, pp.3736-3741. Dec. 1998
- [4] 노동기, 김근우, 이범희, "Structured Light 기법을 이용한 이동 로봇의 상대위치 추정 알고리즘 연구", 제어.자동화 시스템공학 논문지 제 11권, 제 8호, pp. 678-687, 8월, 2005.
- [5] Yihong Wu, Guanghui Wang, Zhanyi Hu, "Euclidean Reconstruction of a Circular Truncated Cone only from its Uncalibrated Contours", <http://www.ee.cuhk.edu.hk/~ghwang/Papers/WUIVC.pdf>, 2003.
- [6] Jyungmin Jeong, Youngsoo Choi, Jaiwan Cho, Sung-uk Lee, Seungho Kim, "Camera Calibration and Measurement Using Circular Grooves inside Pipes", Int. Conf. on Advanced Robotics 2005, pp. 635-639, July. 2005