

# 전방향 등극기하를 이용한 이동로봇의 효과적인 특징대응

강현덕, 조강현

울산대학교 전기전자정보시스템공학부

## Effective Feature Correspondence using Omnidirectional Epipolar Geometry for Mobile Robot

Hyun-Deok Kang, Kang-Hyun Jo

School of Electrical Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

본 논문에서는 전방향 등극기하를 이용하여 이동로봇의 효과적인 표식대응에 대하여 기술한다. 전방향 영상에서 등극점과 등극선의 특성에 따라 추출된 특징의 영상내 위치를 추정한다. 예측된 특징의 영상위치정보를 통해 효과적인 특징 대응을 하며 본 연구에서는 두영상에서 8개의 대응점을 이용하여 기초행렬  $F$ 를 구하고 이것으로 특징의 공간정보를 계산한다. 따라서 기초행렬  $F$ 에서 계산된 기본행렬  $E$ 로부터 로봇은 자신의 위치와 운동정보(회전, 병진운동)를 알 수 있다. 또한 효과적인 특징대응을 위해 탐색범위를 축소함으로써 계산시간의 단축과 강인한 특징대응을 제시하였다.

### I. 서 론

이동로봇은 기본적인 자기위치추정과 공간정보를 인식하기 위하여 카메라를 통해 획득된 시각정보를 이용한다. 본 연구에서는 전방향 시각시스템과 이를 탑재한 이동로봇을 이용하였다.

전방향 시각시스템은 Nayar et al<sup>[1]</sup>에서 기하학적 이론의 토대를 제시하였다. 로봇이 자신의 위치와 공간정보를 인식하기 위해서 시각시스템을 이용하는 방법 중 등극기하를 이용하는 방법이 일반적인데 이 중에서 전방향 시각시스템에서 등극기하를 이용하여 주변환경 정보를 인식하는 경우 다양한 방법들이 제시되고 있다.<sup>[2,3,4,5,6]</sup> 전방향 등극기하란 1개의 CCD카메라와 곡면거울의 조합으로 이루어진 시각시스템을 이용한 등극기하를 의미한다. 본 논문에서 채택한 이동로봇의 가동 환경은 평면공간이 아닌 굴곡질 수 있는 실외공간을 가정한다. 따라서 로봇은 자신의 가동 환경에 대한 기하정보가 필요하다. 로봇은 센서를 통해 획득한 시각정보를 이용하여 자신과 주변 환경과의 관계를 알 수 있어야 한다.

본 논문은 획득된 영상에서 건물이나 여러 가지 물체의 특징들 즉, 물체의 코너점, 또는 수직에지를 추출하여 등

극기하를 계산한다. 최소 8개의 대응점이 존재하면 두 영상간의 기하관계( $R, t$ )를 알 수 있다. 따라서, 두 영상간 특징들의 대응점을 효과적으로 추출해 낸다면 영상 계열간에서 로봇의 등극기하를 알 수 있다.

전방향 영상시스템은 그 고유한 성질에 의하여 각 영상마다 두 개의 등극점과, 직선이 아닌 등극곡선을 지닌다. 로봇에 고정된 전방향 시각시스템은 로봇의 이동에 의해 등극점이 영상에 위치하게 된다. 이 점을 고려하여 등극점이 존재하게 될 최대, 최소 영역을 영상에서 가정할 수 있으며, 이 존재 영역 내에서 추출된 이전특징의 현재영상에 위치할 대응곡선을 추정할 수 있다. 이것은 현재영상에서 대응점의 추출을 전체영상을 검색하지 않아도 설정한 관심영역 내에 반드시 대응점이 존재해야 하므로 적은 검색시간과 강인한 표식대응이 이루어진다. 이렇게 구한 8개의 대응점으로부터 계산된 등극기하는 매 영상 열마다 로봇이 환경에 놓인 상태를 알 수 있다. 즉 공간의 기울어짐을 계산된 기본행렬( $E$ )로부터 알 수 있다. 따라서 로봇은 자신의 운동 상태를 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법은 전방향 시각시스템을 이용하는 이동로봇이 등극기하를 이용하여 매 영상열마다 추출된 표식들을 효과적으로 대응하는 방법을 제시하고 있다.

### II. 전방향 등극기하

전방향 등극기하란 곡면거울의 특성으로 인하여 일반적인 등극기하와는 다른 등극기하의 특성을 가지게 된다. 그림 1에서와 같이, 공간상의 점  $X$ 가 곡면거울에 맺힌 점을 각각  $X_{M1}$ ,  $X_{M2}$ 라 하면 이들은 식(1)의 등극기하방정식<sup>[9]</sup>을 만족한다.

$$X_{M2}^T E X_{M1} = 0 \quad (1)$$

거울에 맺힌 두 점은 각각 카메라에 사영되게 되며 이점을 각각  $q_1, q_2$ 라 하며  $X_{M1}, X_{M2}$ 와  $q_1, q_2$ 간의 관계는 Nayar et al<sup>[1]</sup>, Svoboda et al<sup>[10,11]</sup>에서와 같이 밝힌대로 곡면거울의 형태에 따라 카메라에 사영된다.

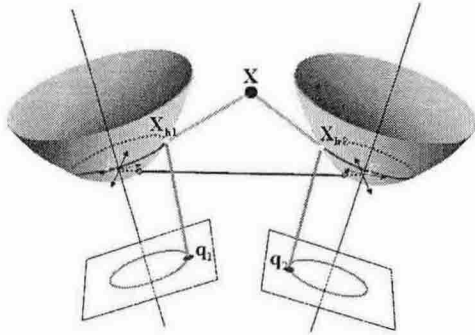


그림 1. 전방향 등극기하

공간상의 점  $X$ 와 두 곡면거울에 맺힌 점  $X_{M1}, X_{M2}$ 이 이루는 평면을  $px + qy + sz = 0$ 라 하면 영상의 두 점  $q_1, q_2$ 과 공간상의 점  $X$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$q_2^T A(E, q_1) q_2 = 0 \quad (2)$$

$$A(E, q_1) = K^{-T} R_c N^T A_{X_2} N R_c^T K^{-1} \quad (3)$$

$$N^T A_{X_2} N = \begin{bmatrix} -4s^2 a^2 e^2 + p^2 b^4 & pqb^4 & psb^2(-2e^2 + b^2) \\ pqb^4 & -4s^2 a^2 e^2 + q^2 b^4 & qsb^2(-2e^2 + b^2) \\ psb^2(-2e^2 + b^2) & qsb^2(-2e^2 + b^2) & s^2 b^4 \end{bmatrix}$$

여기서  $K$ 는 영상의 내부행렬이며,  $R_c$ 는  $z$ 축으로의 회전행렬이다.  $a, b$ 는 쌍곡면 거울의 형태에서 장축과 단축의 비를 결정짓는 파라미터이고, 여기서  $e = \sqrt{a^2 + b^2}$ 이다.

비선형함수인  $A(E, q_1)$ 은 전방향 등극기하에서 기초행렬  $F$ 가 된다. 영상간의 특징점의 대응점을 찾을 수 있다면 이 특징점의 공간상의 점의 위치를 알 수 있다. 본 논문에서는 일반적인 선형해법을 적용할 수 있는 8점 대응법<sup>[7]</sup>을 이용하여 기초행렬  $F$ 를 계산한다. 특징의 추출법과 8점 대응법을 이용하여 시계열 영상에서 특징점의 대응점을 찾는 방법은 다음 장에서 기술한다.

### III. 특징추출

본 논문에서 로봇은 자신의 위치와 주변물체의 기하정보를 인식하기 위하여 코너점을 이용한다. 본 연구에서는 Tomasi-Kanade 특징추출법<sup>[7]</sup>을 이용한다. 이 특징추출법은 시계열 영상에서 대응영상간의 같은 위치의 픽셀 값은 다음의 방정식을 만족한다.

$$I(x, y, t+1) = I(x - \xi, y - \eta, t) \quad (4)$$

시계열에서 획득한 영상에서 같은 위치의 픽셀의 대응관계에서 식(4)를 만족하며 여기서  $\delta = (\xi, \eta)$ 는 점  $X = (x, y)$ 의 변위를 말한다. 따라서 한 점  $X$ 의 추출로 생각하기 보다는 그 점을 포함한 일정 크기의 영역윈도의 변위( $\delta$ )로 생각할 수 있다. 위의 변위벡터  $\delta$ 가 어떠한 운동을 한다고 가정한다면

$$\delta = DX + t \quad (5)$$

여기서  $D = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix}$ 인 변위행렬이며,  $t$ 는 특징 윈도의 중심의 병진벡터이다. 따라서,  $k$ 번째 영상  $I^k$ 에 있는 점  $X$ 가  $k+1$ 번째 영상  $I^{k+1}$ 에 있는  $AX+t$ 의 점으로 이동할 때 다음 식을 만족한다.

$$I^{k+1}(AX+t) = I^k(X) \quad (6)$$

식 (6)은  $I^k(X)$ 가 다음 영상에서 현재위치로부터  $DX+t$ 만큼 이동하는 것을 말한다. 여기서  $A=I+D$ 이고  $I$ 는  $2 \times 2$ 의 단위행렬이다.

추출된 특징 중에서 이전 영상과 현재 영상사이에서 같은 특징점을 대응하는 것이 중요하다. 따라서 (6)식을 바탕으로 두 영상간의 동일점의 변화가 최소가 되는 점을 대응 윈도내에서 찾아야 한다.

따라서

$$\min_X \int_W [I^{k+1}(AX+d) - I^k(X)]^2 dX \quad (7)$$

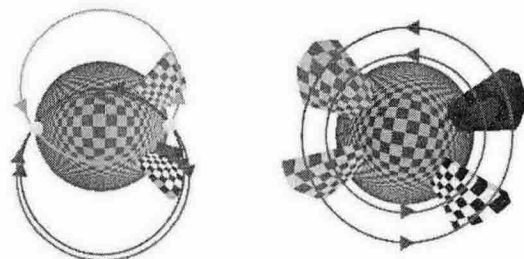
여기서  $W$ 는 주어진 특징 윈도이다.

### IV. 특징대응

시계열 영상에서 코너점이 추출되면 이전 영상에서 각 특징의 현재 영상에서의 대응점을 찾아야 한다. 본 논문에서는 전방향 영상의 성질과 등극곡선의 영역을 이용하여 대응점을 찾는다.

#### 1. 등극곡선의 형태

전방향 영상에서 로봇의 운동 형태에 따라 등극점의 위치와 등극곡선의 형태가 결정된다. 그림 2는 전방향 영상에서 로봇의 운동 형태에 따른 등극점의 위치와 등극곡선의 형태이다.



(a) 병진운동

(b) 회전운동

그림 2. 전방향 영상에서 로봇의 운동에 따른 등극점의 위치와 등극곡선의 형태

그림 2(a)는 로봇이 직선운동을 할 때 로봇의 이동방향에 따른 등극점의 위치와 등극곡선의 형태와 각 특징점의 방향을 보였다. 그림 2(a)에서 로봇은 좌측에서 우측으로 이동하는 경우이며, 이에 대한 등극점은 영상의 소실점에 각각 위치하며 위치한 특징들의 이동형태는 다음

과 같다. 또한 그림2(b)는 로봇이 순수한 회전운동만을 한 경우이며 생성된 등극곡선은 영상의 중심을 기준으로 결정된다. 로봇의 운동을 회전과 병진운동이 결합된 것으로 가정하면 그림 2에서 보인 것과 같이 등극점의 결정영역은 영상 내 소실점주변에 놓이게 된다. 따라서 예상 등극점이 위치할 최대 최소 영역을 가정하여 각각의 등극곡선을 구한다.

## 2. 등극점의 영역

등극점이 존재할 영역은 로봇의 가동환경에 따라 의존한다. 만약 로봇이 굴곡진 영역이 많은 곳을 이동한다면 각 지점의 기울어짐에 따라 등극점의 위치가 달라진다. 로봇의 이동방향과 환경의 경사도에 따라 영상내 두 등극점의 위치가 결정되며 등극점이 존재할 영역은 그림3과 같다.

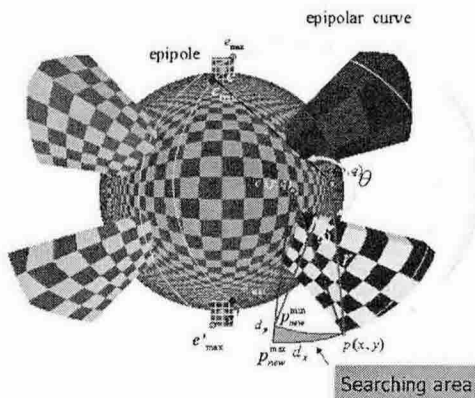


그림 3. 등극점의 예상영역과 각 등극점에 따른 최대, 최소의 등극곡선과 대응점의 탐색영역

로봇은 자신의 가동환경에 대한 정보를 가지고 있지 않다. 따라서 추출된 시각정보를 통해 환경의 기하정보를 계산하고 자신의 운동상태를 파악하여야 한다. 그림 3에서와 같이, 실제 등극점을  $e, e'$ 라 하면 등극점의 예상영역은 각 최대, 최소 등극점을 포함하는 영역이다. 여기서 최대 최소 등극점을 각각  $e_{min}, e'_{min}, e_{max}, e'_{max}$ 라 한다.

## 3. 표식대응

예상된 최대, 최소 등극점(쌍)과 이전 영상에서 추출된 특징점  $p(x, y)$ 이 이루는 함수를 각각  $f_{min}, f_{max}$ 라 하면

$$f_{max} = f(e_{max}, e'_{max}, p), f_{min} = f(e_{min}, e'_{min}, p) \quad (8)$$

두 함수의 중첩영역이 바로 현재 영상에서 대응점이 존재할 영역이 된다. 다시 말해서, 두 함수의 중첩영역에 이전 영상에서 추출된 특징의 대응점이 존재한다. 따라서 이 영역에서 대응점이 존재하면 시계열 영상열에서 같은 점이라 간주할 수 있다.

중첩영역의 각 선분을 각각  $d_x, d_y$ 라 하면

$$d_x = r\omega = L\sin\theta \quad (9)$$

여기서  $r$ 은 각각 계산된 함수의 중심에서 특징점  $p(x, y)$ 까지의 거리이며,  $L$ 은 이동로봇이 장착된 엔코더 센서에 의해 얻어진 이동거리이며  $\theta$ 는  $c$ 를 중심으로 등극점에서부터 특징점  $p(x, y)$ 까지의 각도를 말한다. 따라서, 식 (9)를 이용하여  $w$ 를 알 수 있으며 이를 이용하여 점  $p_{new}(x, y)$ 를 얻을 수 있다.

$$p_{new} = R_w p + c \quad (10)$$

여기서  $R_w = \begin{bmatrix} \cos\omega & -\sin\omega \\ \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$ 이고  $c$ 는 이전 영상에서 계산된 함수의 중심이다.

$d_y$ 의 결정은 최대 최소의 등극점을 이용한 두 곡선에서 계산된 점들의 거리이다.

$$d_y = \text{dist}(p_{new}^{max} - p_{new}^{min}) \quad (11)$$

따라서 계산된  $d_x, d_y$ 를 이용하여 이전 영상에서 추출한 특징의 대응점의 영역이 결정된다.

대응점이 결정되고 나면 마찬가지로 실제 등극점이 계산된다. 따라서 대응점과 등극점(쌍)을 이용하여 실제 등극곡선을 그릴 수 있으며 결과적으로 등극기하를 알 수 있다. 그러므로 계산된 등극기하에 의하여 로봇의 3차원 운동정보가 계산된다.

## V. 실험

본 논문에서는 전방향 시각시스템을 탑재한 로봇을 이용하여 실험하였다. 곡면 거울은 쌍곡면 형태로 곡면방정식은 다음과 같다.

$$\frac{(z+e)^2}{a^2} - \frac{x^2+y^2}{b^2} = 1 \quad (12)$$

식 (12)에서  $a, b$ 는 곡면타원의 장단축 반경이며, 실험에서 각각  $a=28.19mm, b=9.40mm$  이고, 이심율은  $e=\sqrt{(a^2+b^2)}$  이다. 실험은 실내복도를 주행하는 로봇으로부터 획득한 영상에서 코너점을 추출하여 각 영상의 등극기하를 계산하였다. 본 논문에서 제안한 방법으로 추출된 특징점의 대응영역을 계산하고 실제 다음 영상에서 대응점이 예측된 대응영역내에 존재여부 및, 대응점의 계산된 위치와 실제위치와의 오차를 계산하였다.

### 1. 특징추출

Tomasi-Kanade 코너추출법<sup>[8]</sup>을 이용하여 특징점을 추출하였다. 추출 특징의 개수는 100개로 제한하였다. 그림 4는 실험 영상열 중의 하나이다. 또한 거울의 영역을 벗어나거나 영상의 중심에서 보이는 로봇의 자체 형상에서 추출되는 코너점은 특징점에서 제외하였다. 이것은 그림 5에서 붉은 색 원과 노란색 원 사이의 영역내에서 추출되는 코너점을 특징으로 삼았다.

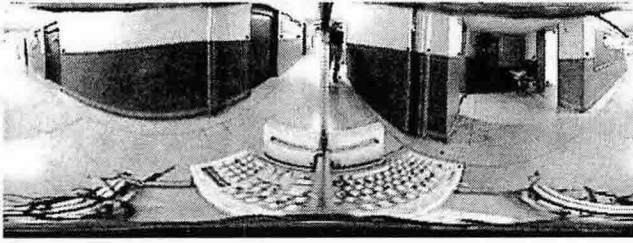


그림 4. 복도 주행시 특징추출 결과

## 2. 기초행렬 F 및 등극기하 계산

추출된 특징점을 가지고 기초행렬 F와 이에 따른 등극선을 계산하였다. 기초행렬 F의 값은 아래와 같으며 계산된 등극선은 그림 5와 같다. 또한 본 논문에서 제시한 특징대응의 영역설정과 Tomasi-Kanade 방법을 이용한 특징대응법을 이용하여 각각 기초행렬 F와 등극점을 구하였다.

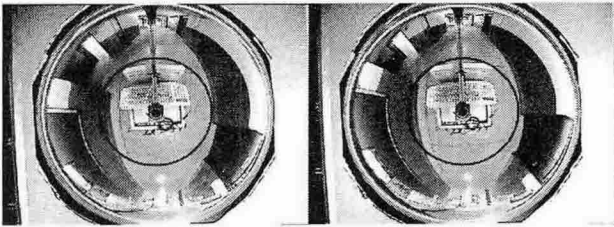


그림 5. 실내 복도 주행에 의한 실험영상

첫 번째 영상열의 경우 34개의 대응점이 추출되었다. 실제 로봇의 이동형태는 복도를 따라 병진운동을 하는 경우이므로 계산된 F의 형태를 따른다. 또한 한 개의 곡면 거울을 이용하여 이전 위치와 이동한 후의 위치에서 획득한 영상을 이용하여 등극기하를 완성하였으므로 등극점의 위치 또한 거의 동일한 지점을 가리키고 있다.

표 1. 기초행렬 F와 각 등극점

F			$e_1$	$e_2$
0.000	-0.003	0.456	0.627	0.622
0.003	-0.000	-0.376	0.779	0.783
-0.478	0.377	1.000	0.005	0.005

## 3. 대응영역의 계산 및 대응점과의 상관관계

추출된 특징점을 이용하여 예상등극선의 영역을 계산한 뒤 각각  $d_x, d_y$ 를 계산한다. 계산된  $d_x, d_y$ 를 가지고 영역을 설정한 뒤 실제 대응점의 위치와 계산된 대응점의 위치 에러를 계산한다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 전방향 등극기하를 이용하여 효과적인 특징대응법을 제시하고 이 방법에 따른 실험을 수행하였다. 일반적인 대응과는 달리 전방향 시각시스템의 특성

상 등극곡선을 따라 물체의 이동성이 결정되므로 등극점의 예상범위를 결정하여 이들의 최소 최대 등극점에서 나타나는 등극곡선의 범위 내에 대응점이 존재한다. 결정된 대응점으로 인하여 등극곡선의 방정식이 존재하며 이것을 토대로 각 영상열마다 등극기하에서 계산된 회전행렬과 병진벡터가 계산된다. 따라서 로봇의 현재 운동 특성이 결정된다. 제안된 방법을 이용하여 실험한 결과 대응영역을 결정하는  $d_x$ 의 값은 영상프레임간의 시간차와 로봇의 이동속도에 의존한다. 또한 등극점의 주변으로 특징점의 위치가 가까워지면 대응영역의 크기가 줄어들므로 이전 영상에서 특징점은 현재 영상에서 효과적인 대응점을 찾을 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Baker S and Nayar S K, "A theory of catadioptric image formation", In ICCV'98, pp 35-42, 1998
- [2] Yagi Y, Kawato S, "Panoramic scene analysis with conic projection", In Proc. IROS, 1990
- [3] Yamazawa K, Yagi Y and Yachida M, "Omnidirectional imaging with hyperboloidal projections", Proc. IROS., 1993.
- [4] Gluckman J, Nayar S K, and Thorek K, "Real-time omnidirectional and panoramic stereo", In *Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop*, vol. 1, pp 299- 303. 1998
- [5] Sogo T, Ishiguro H, and Trivedi M M, "N-Ocular Stereo for Real-time Human Tracking". *Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications*, (R. Benosman and S. B. Kang, eds.), Springer Verlag. 2000
- [6] Ishiguro H, Yamamoto M, and Tsuji S, "Omni-directional stereo for making global map". *ICCV'90*, pp 540-547. 1990
- [7] Hartley, R. "In defence of the 8-point algorithm". In *Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV'95)*, IEEE Computer Society Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 1064 - 1070. 1995
- [8] Shi, J. and Tomasi, C. "Good features to track". In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, IEEE Computer Society, Seattle, Washington, pp. 593 - 600. 1994
- [9] Longuet-Higgins, H.C. "A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections". *Nature*, 293: pp 133 - -135. 1981
- [10] Svoboda, T., Pajdla, T., Hlaváč, V., "Central Panoramic Cameras: Geometry and Design", Technical Report N° K335/97/147, Czech Technical University, Department of Control Engineering, December. 1997.
- [11] Svoboda, T., Pajdla, T., Hlaváč, V., "Epipolar Geometry for Panoramic Cameras" In fifth European Conference on Computer Vision, Freiburg, Germany, pp. 218-232. 1998