

논문 2007-44SP-5-5

사영 컨투어를 이용한 전방향 카메라의 움직임 추정 방법

(Omnidirectional Camera Motion Estimation Using Projected Contours)

황 용 호*, 이 재 만*, 홍 현 기**

(Yongho Hwang, Jaeman Lee, and Hyunki Hong)

요 약

넓은 시야각을 갖는 전방향(omnidirectional) 카메라 시스템은 적은 수의 영상으로도 주변 장면에 대해 많은 정보를 취득할 수 있는 장점으로 카메라 교정(calibration), 공간의 3차원 재구성(reconstruction) 등에 널리 응용되고 있다. 실 세계에 존재하는 직선 성분들은 전방향 카메라 모델에 의해 컨투어로 사영(projection)되기 때문에, 영상간에 대응되는 컨투어 성분은 카메라의 회전 및 이동 등의 추정에 효과적으로 활용될 수 있다. 본 논문에서는 전방향 카메라의 변환 파라미터를 추정하기 위한 2단계 최소화 알고리즘이 제안된다. 제안된 알고리즘은 컨투어를 이루는 대응점에 대한 에피폴라(epipolar) 평면과 3차원 벡터간의 각도 오차함수 및 사영된 컨투어의 거리 오차를 단계별로 최소화하는 카메라 파라미터를 계산한다. 등거리(equidistance) 사영된 합성영상과 어안렌즈(fisheye lens)로 취득한 실제 영상을 대상으로 제안된 알고리즘이 카메라의 위치 정보를 정확하게 추정함을 확인하였다.

Abstract

Since the omnidirectional camera system with a very large field of view could take many information about environment scene from few images, various researches for calibration and 3D reconstruction using omnidirectional image have been presented actively. Most of line segments of man-made objects are projected to the contours by using the omnidirectional camera model. Therefore, the corresponding contours among images sequences would be useful for computing the camera transformations including rotation and translation. This paper presents a novel two step minimization method to estimate the extrinsic parameters of the camera from the corresponding contours. In the first step, coarse camera parameters are estimated by minimizing an angular error function between epipolar planes and back-projected vectors from each corresponding point. Then we can compute the final parameters minimizing a distance error of the projected contours and the actual contours. Simulation results on the synthetic and real images demonstrated that our algorithm can achieve precise contour matching and camera motion estimation.

Keywords : Omnidirectional camera, camera calibration, projection model, corresponding contour

I. 서 론

영상 시퀀스로부터 카메라 위치 추정, 3차원 재구성(reconstruction) 기술 등은 컴퓨터 비전 분야에서 중요

한 연구주제이며, 이를 위해 다중 시점(multi-view) 영상 내에 대응되는 점, 직선, 곡선 등의 특징 검출 및 정합(matching)과정이 요구된다. 그러나 카메라가 많이 이동하는 경우, 두 영상 프레임 내에 중복되는 영역이 줄어들어 정확한 정합이 어렵게 된다. 180도 이상의 넓은 시야각을 갖는 전방향(omnidirectional) 카메라로부터 취득된 영상은 주변 환경에 대해 상대적으로 많은 정보를 취득할 수 있기 때문에 교정(calibration) 등의 연구가 활발히 진행되고 있다^[1~12].

본 논문에서는 전방향 카메라의 변환 파라미터를 추정하기 위한 2단계 최소화 알고리즘이 제안된다. 실 세

* 학생회원, ** 평생회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과

(Dept. of Image Eng., Graduate School of Advanced Imaging Science Multimedia & Film, Chung-Ang Univ.)

※ 본 연구는 서울시 산학협력사업으로 구축된 서울 미래형콘텐츠컨버전스 클러스터, 문화콘텐츠진흥원의 CT연구소 지원사업으로 수행되었습니다.

접수일자: 2007년4월25일, 수정완료일: 2007년8월27일

계에 존재하는 직선 성분들은 전방향 영상에 컨투어로 사영(projection)되기 때문에, 영상간에 대응되는 컨투어 성분은 카메라의 회전 및 이동 등의 추정에 효과적으로 활용될 수 있다. 먼저, 교정 패턴을 이용해 전방향 카메라의 사영모델을 추정한 다음, 전방향 영상 프레임 내에서 대응되는(corresponding) 컨투어의 양 끝점을 대응점으로 설정한다. 각 대응점에 대한 에피폴라(epipolar) 평면과 역사영된 3차원 벡터간의 각도 오차를 최소화하여 두 영상을 촬영한 카메라의 상대적인 회전과 이동에 대한 단위 방향벡터를 구한다. 그리고 임의의 스케일로 두 영상의 카메라 시점을 결정하고 3차원 공간 상에 직선 성분을 재구성한 후, 세 번째 영상에 3차원 직선을 사영시켜 얻은 컨투어와 영상에 존재하는 실제 컨투어 간 거리 오차의 최소화를 통해 카메라의 회전과 상대적인 스케일을 포함한 위치 정보를 결정한다. 임의의 장면을 대상으로 등거리(equidistance) 사영된 합성영상과 어안렌즈(fisheye lens)로 취득된 실제 영상에 대한 실험결과로부터 제안된 알고리즘이 카메라의 이동 및 위치 정보를 정확하게 추정함을 확인하였다. 제안된 방법은 장면의 3차원 재구성, 영상기반 재조명 기술, 영상합성, 매치무브를 포함한 시각효과 등에 다양하게 활용될 수 있다.

II장에서는 전방향 카메라 모델과 관련된 기존 연구를 설명하고, III장에서 전방향 카메라의 사영모델과 제안된 알고리즘을 설명한 다음, 실험 결과와 분석 내용을 IV장에서 기술하고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

초기에는 전방향 카메라를 핀홀(pinhole) 카메라 모델로 변환하여 카메라의 사영관계를 추정하는 방법이 주로 제안되었다^[1-3]. 공간 상에 존재하는 직선은 전방향 영상에서 컨투어로 사영되며, 이렇게 왜곡(distortion)된 컨투어를 원래의 직선으로 변환시켜 카메라의 사영모델을 추정하지만 전체의 시계 영역을 모두 표현하지 못한다. Xiong 등은 네 개의 어안렌즈로부터 취득한 영상의 왜곡과 시야각을 자동교정하여 파노라마 영상을 구성했다^[4]. 그러나 카메라의 초기 설정 정보가 필요하며 렌즈의 종류에 따라 부정확한 교정을 실행하는 경우가 있다. Sato 등은 전방향 스테레오 알고리즘을 이용하여 3차원 공간 구성에 요구되는 사용자의 직접적인 입력값을 간소화했다. 그러나 이 방법은 카메라의 위치와 내부(intrinsic) 파라미터에 대한 사전정보가

필요하다^[5]. Shah와 Bakstein은 일반화된 전방향 영상의 교정 방법을 제안했지만, 실험과정에서 레이저 빔과 실린더 형태의 교정 패턴을 이용해야 하는 번거로움이 있다^[6,7].

근래에는 전방향 카메라 모델에 관한 연구가 자동교정과 연계되어 제안되고 있다^[8-10]. Micusik등은 에피폴라 기하의 선형화와 전방향 카메라 모델을 동시에 추정하는 방법을 제안했으며^[8], Thirthala 등은 다중 시점 기하를 이용하는 방법을 개발했고^[9], Claus 등은 카메라의 이동과 렌즈의 기하를 동시에 선형화하여 추정하는 왜곡모델을 제안했다^[10]. 또 최근 Barreto등은 광각 렌즈에서 발생하는 왜곡을 보정하는 방사 기본 행렬(radial fundamental matrix)을 소개했지만^[11], 대부분의 연구는 전방향 카메라의 모델 추정보다는 자동교정 방법을 주로 다루었다. 최근에 Kannala 등은 교정 패턴을 이용하여 전방향 카메라뿐만 아니라 일반 카메라도 정확하게 모델링할 수 있는 일반적인 방법이 제안되었지만 사전에 패턴을 제작하고 영상을 취득해야 하는 단점이 있다^[12].

곡선 및 직선의 정합에 대한 기존 연구는 기하학적인 조건(constraint)을 사용하는지 여부에 따라 크게 두 가지로 분류된다. 다중 시점의 기하를 사용하는 연구들은 계산의 복잡성에도 불구하고, 카메라의 큰 움직임에 따른 가려짐 문제를 극복하기 위해 진행되었다^[13, 14]. 기존에 에피폴라 기하를 사용한 컨투어 정합방법이 제안되었지만 전방향 영상에 적용된 연구는 거의 없다. 기존 에피폴라 구속조건을 이용하여 에센셜(essential) 행렬을 추정하고 분해하는 방법^[15]도 있지만, 전방향 영상의 왜곡으로 인해 대응점을 찾기 어렵다. 또한 좋은 결과를 위해 RANSAC 등의 강건한 알고리즘^[16]을 이용하면 많은 계산 시간이 필요하며, 카메라의 위치에 대한 단위 방향벡터만을 추정하기 때문에 영상 시퀀스에서의 이동 정도 등을 결정하기 힘들다. 본 논문에서는 사전에 해석된 전방향 카메라의 사영모델을 대상으로 영상에 존재하는 각 대응점에 대한 에피폴라 평면과 역사영된 3차원 벡터간의 각도 오차함수 및 사영된 컨투어의 거리 오차의 단계별 최소화를 통해 카메라 간의 상대적인 위치와 회전 정보를 추정하는 방법이 제안된다.

III. 제안된 방법

기존의 사영모델과 교정 방법을 간략하게 설명하고, 카메라의 상대적인 위치와 회전 정보의 추정을 위한 2

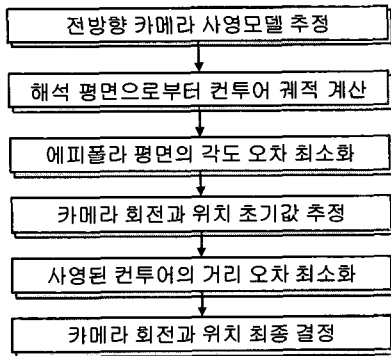


그림 1. 제안된 알고리즘의 흐름도
Fig. 1. Block diagram for proposed algorithm.

단계 최소화 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 카메라 시점까지의 3차원 벡터의 입사각 크기에 따른 전방향 영상의 중심으로부터 사영된 거리의 함수 관계를 추정하는 다음, 각 영상에 존재하는 컨투어를 구성하는 대응점에 대한 에피폴라 평면과 역사영된 3차원 벡터간의 각도 오차함수를 최소화하는 회전 및 위치 정보를 초기값으로 설정한다. 그리고 세번째 영상으로 사영된 컨투어와 실제 컨투어의 거리 오차를 최소화하는 과정을 통해 카메라 정보를 최종 결정한다. 제안된 알고리즘에 대한 흐름도를 그림 1에 보였다.

1. 사영모델

일반적인 원근(perspective) 사영모델은 어안렌즈로 취득된 전방향 영상의 사영관계를 표현할 수 없으며, 전방향 영상의 특성에 따라 방사상으로 대칭된 사영모델이 필요하다. 핀홀 카메라 모델은 다음 식 (1)과 같은 원근 사영모델로 표현된다.

$$r = f \tan \theta, \tag{1}$$

여기에서 θ , r , f 는 각각 카메라 중심축(principal axis)과 입사광 사이의 각도, 영상의 중심점(principal point)으로부터의 거리, 초점거리(focal length)이다. 반지름

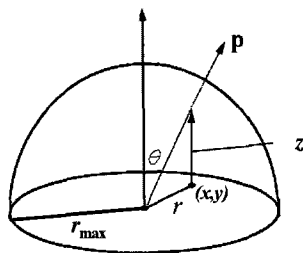


그림 2. 전방향 카메라 직교 사영모델
Fig. 2. Orthogonal projection model of omnidirectional camera.

r_{max} 인 전방향 영상에서 거리 r 만큼 떨어진 픽셀의 입사 벡터 P 와 높이값 z 로 구성되는 직교(orthogonal) 사영 모델을 그림 2에 나타내었다.

식 (1)의 원근 사영모델은 θ 가 90° 일 때 r 값이 무한대가 되어 전방향 카메라 모델로 사용할 수 없기 때문에 일반적으로 다음 식 (2)~(5)의 사영모델이 사용된다.

$$r = 2f \tan(\theta/2) \text{ (스테레오그래픽사영)}, \tag{2}$$

$$r = f\theta \text{ (등거리 사영)}, \tag{3}$$

$$r = 2f \sin(\theta/2) \text{ (등입체각사영)}, \tag{4}$$

$$r = f \sin \theta \text{ (직교 사영)} \tag{5}$$

전방향 카메라의 사영모델을 추정하기 위해 위의 사영모델을 대상으로 교정패턴을 취득한 영상으로부터 9개의 파라미터로 표현된 함수를 구하는 방법을 이용한다. 방사상으로 대칭성을 갖는 일반적인 모델을 다음 식 (6)과 같이 파라미터 k 로 표현하여 나타낼 수 있다 [12].

$$r(\theta) = k_1\theta + k_2\theta^3 + k_3\theta^5 + k_4\theta^7 + k_5\theta^9 + \dots, \tag{6}$$

CCD에 맺힌 영상이 디지털화되는 과정에서 카메라의 중심점과 종횡비(aspect ratio) 등을 포함한 내부 파라미터도 함께 추정된다. 즉, 사영모델을 위한 5개의 파라미터와 카메라의 4개의 내부 파라미터를 포함한다.

2. 사영된 컨투어

인공 건축물, 실내 환경 등에 다양하게 존재하는 직선 성분들은 전방향 카메라 모델에 의해 영상에 컨투어의 형태로 사영된다. 따라서 추정된 카메라의 사영모델과 컨투어의 양 끝점 좌표를 이용하여 각 영상에 사영된 컨투어의 궤적을 계산할 수 있으며, 이런 관계는 카메라의 이동 및 회전 파라미터 추정 등에 유용하게 적용된다.

그림 3은 3차원 공간상의 직선 성분(line segment)이 반구(hemi-sphere) 상에 맵핑된 다음, 영상면(image plane)에 컨투어로 직교 사영되는 관계를 나타낸다. 직선 성분과 카메라 중심으로 구성되는 해석 평면(interpretation plane) Π 를 정의하며, 이 평면의 법선 벡터 $m = (m_x, m_y, m_z)$ 은 양 끝점의 방향벡터 p_1 과 p_2

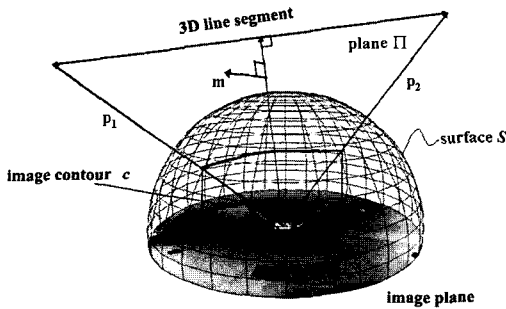


그림 3. 구 모델에 컨투어로 직교 사영된 3차원 공간의 직선 성분
 Fig. 3. 3D line segment projected as the contour on the image plane.

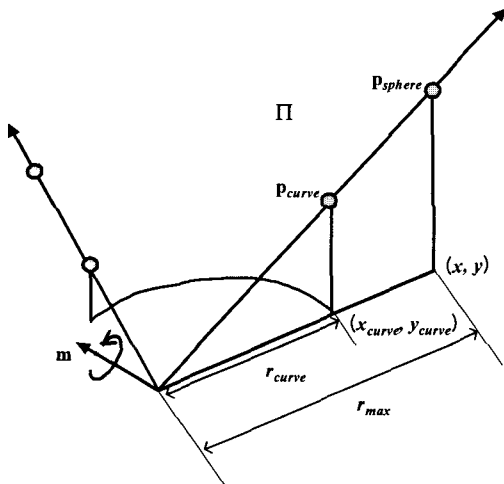


그림 4. 구 모델의 교선과 추정된 모델의 교선의 관계
 Fig. 4. Relation of intersection curve between sphere and estimated projection model.

의 외적(cross product: $p_1 \times p_2$)을 통해 계산된다. 영상면에서 컨투어 c 는 평면 Π 와 구면 S 상의 선분이 직교 사영된 성분이며, 구면상의 선분에 대한 3차원 벡터는 p_1 을 법선벡터 m 을 기준으로 p_2 까지 회전 변환하여 구할 수 있다.

어안렌즈를 이용한 전방향 카메라의 사영관계는 일반적으로 반구형태로 모델링되지 않기 때문에 평면 Π 와 추정된 카메라 사영모델이 교차하는 벡터 p_{curve} 을 구하기 위해 먼저, θ 가 최대 시야각일 때 카메라 중심으로부터의 거리 r_{max} 를 반지름으로 하는 구와의 교차하는 벡터 p_{sphere} 을 구한다. 그리고 이 벡터를 평면 Π 의 법선벡터 m 을 축으로 회전하며 추정된 카메라 사영모델에 투영하여 컨투어의 궤적을 계산한다. 그림 4와 같이 삼각형의 비례식을 사용하여 구모델과 교차하는 벡터를 추정된 카메라 사영모델에 투영하여 컨투어의 궤적을 구할 수 있다. 추정된 카메라 사영모델로부터

입사각 θ 에 대한 r_{curve} 을 구하고, 영상면에 사영된 컨투어의 2차원 좌표를 식 (7)로 결정한다.

$$y_{curve} = \pm \sqrt{r_{curve}^2 - x_{curve}^2}, x_{curve} = x \times (r_{curve} / r_{sphere}) \quad (7)$$

3. 전방향 카메라의 회전 및 위치 추정

다중 시점의 전방향 영상으로부터 카메라의 회전과 상대적인 위치 정보를 추정하기 위해 각 대응점에 대한 에피폴라 평면과 역사영된 3차원 벡터간의 각도 오차의 최소화 과정을 통해 초기의 위치 정보를 추정하고, 보다 정밀한 최종 결과를 위해 사영된 컨투어의 거리 오차를 최소화하는 카메라 파라미터를 결정하는 2단계 (coarse-to-fine) 알고리즘이 제안된다.

가. 각 초기값 추정단계

임의의 두 영상의 컨투어 양 끝점들을 대응점으로 하여 카메라의 위치와 회전 정보를 대략적으로 추정하는 방법이 제안된다. 여러 장의 전방향 영상에서 초기 영상의 시점을 월드 좌표계의 원점에 해당하는 기준 시점 (base view)으로 설정한다. 이후 프레임($k = 1, \dots, n-1$)의 전방향 영상들은 원점으로부터 스케일 요소(s_k)와 단위 방향벡터(t_k)가 고려된 상대적 위치($C_k = s_k \times t_k$)와 회전행렬 R_k 에 의해 변환된 참조 시점(reference view)에서 취득된 영상으로 간주한다. 여기에서 기준 시점의 위치 C_0 와 회전행렬 R_0 는 각각 $(0,0,0)$ 와 I 이다. 기준 시점과 임의의 참조 시점 간의 기하 관계를 그림 5에 나타내었다. 두 영상간에 대응되는 m 개의 컨투어 양 끝점을 $2m$ 개의 대응점으로 설정한 다음, 각 지점에서의 각도 오차를 식 (8)로 계산한다.

p_{i0} 과 p_{i1} 는 기준 시점과 참조 시점에서 i 번째 대응

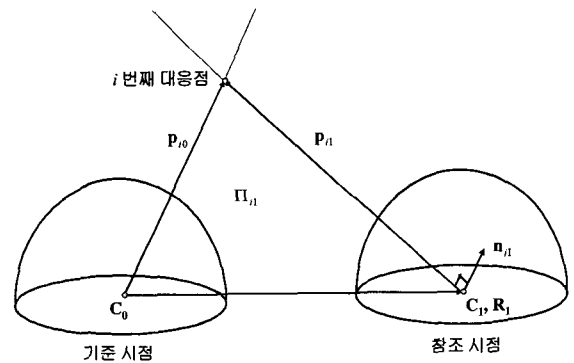


그림 5. 기준 시점과 참조 시점간의 기하 관계
 Fig. 5. Geometrical relation between base and reference view.

점에 대해 역사영된 3차원 벡터이며, Π_{i1} 은 \mathbf{p}_{i0} 와 C_1 의 단위 방향벡터 \mathbf{t}_1 로 계산된 참조 시점이 구성하는 에피플라 평면, 법선벡터는 \mathbf{n}_{i1} 이다. 역으로 기준 시점에 대한 에피플라 평면 Π_{i0} 와 법선벡터 \mathbf{n}_{i0} 도 계산할 수 있다. 참조 시점에 대한 회전행렬 R_1 과 기준 시점으로부터의 단위 방향벡터 \mathbf{t}_1 이 정확할수록 식 (8)의 오차결과는 0에 수렴하며, 반대의 경우는 1에 가까워진다.

$$E_{angular}(\Theta, \Phi) = \frac{\sum_{i=1}^{2m} (\hat{\mathbf{n}}_{i0} \cdot \hat{\mathbf{p}}_{i0} + \hat{\mathbf{n}}_{i1} \cdot \hat{\mathbf{p}}_{i1})}{4m}, \quad (8)$$

여기에서 ‘^’는 각 벡터의 단위벡터를 나타내며, Θ 와 Φ 는 각각 R_1 과 \mathbf{t}_1 의 y축에 대한 회전각이다. 본 논문에서는 카메라를 삼각대에 설치하여 영상을 취득하기 때문에 카메라는 xz평면상에서 이동하며 y축에 대한 회전만이 고려된다. 식 (9)와 같이 각도 오차가 최소일 때의 Θ 와 Φ 를 R_1 과 \mathbf{t}_1 에 대한 대략적인 초기 회전각 Θ_{init} , Φ_{init} 으로 결정하며 식 (10)의 범위 θ_{max} 내에서 검색한다.

$$(\Theta_{init}, \Phi_{init}) = \arg \min_{\Theta, \Phi} E_{angular}(\Theta, \Phi). \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 : \mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_{init} e^{[\mathbf{w}]_k}, \|\mathbf{w}\| \leq \theta_{max} \\ \mathbf{t}_1 : \mathbf{t}_1 = e^{[\mathbf{w}]_k} \mathbf{t}_{init}, \|\mathbf{w}\| \leq \theta_{max} \end{cases} \quad (10)$$

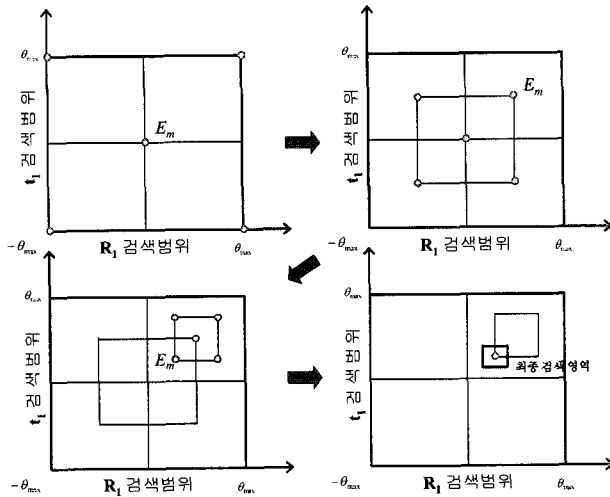


그림 6. 루프 $n=3$ 일 때, 최소 각도 오차를 갖는 회전각 검색

Fig. 6. Case $n=3$, search for rotation angle with minimum angular error.

표 1. 최소 각도 오차를 갖는 회전각 검색 의사 (pseudo) 코드

Table 1. Pseudo code to search for minimum angular error.

```

n=1
// 초기 검색 위치에서 각도 오차 E_m 계산

E_m = E_{angular}(0,0)

Loop
  Search range R = \theta_{max}/2^{n-1}
  // 검색 범위 최외각 4곳의 각도 오차 E_k (k=1,2,3,4) 계산

  E_k = E_{angular}(\pm R, \pm R)

  E_m = \min\{ E_m, E_k \}, 검색 위치 변경
  n=n+1
loop end
    
```

여기에서, $[\mathbf{w}]_k$ 는 회전축 \mathbf{w} 벡터의 스쿼 대칭 (skew-symmetric) 행렬을 나타내며, e 는 행렬의 지수 연산자(exponential operator)이다. 본 논문에서는 y축에 대한 카메라의 회전을 고려하므로 \mathbf{w} 의 단위벡터 $\hat{\mathbf{w}}$ 는 (0,1,0)이고, \mathbf{w} 의 크기인 $\|\mathbf{w}\|$ 는 y축을 기준으로 하는 회전각이다. 초기 회전행렬 R_{init} , 이동 벡터 \mathbf{t}_{init} , θ_{max} 를 각각 I, (1,0,0), π 로 설정하면, 그림 6과 같이 모든 영역에서 각도 오차를 계산하여 최소값을 갖는 위치에서의 Θ 와 Φ 를 각각 R_1 과 \mathbf{t}_1 의 회전각으로 대략적인 초기 설정을 한다.

제안된 검색 방법을 표 1에 정리하였다. 루프 n 번일 때, 계산의 횟수는 $1+4n$ 이며 검색영역은 매 단계마다 $\theta_{max}/2^{n-1}$ 로 줄어든다.

나. 2차 추정단계

앞 과정에서 추정된 카메라의 회전과 이동에 대한 단위 방향벡터로부터 더욱 정확한 회전과 위치 정보를 추정하는 2차 추정 방법이 제안된다. 3차원 공간 상에 선분을 정의하기 위해서는 최소 세 장의 영상이 필요하다 [15]. 초기 단계에서 추정된 \mathbf{t}_1 에 임의의 스케일 s_1 을 곱해서 위치 C_1 를 지정하면 두 영상에서 대응되는 컨투어로부터 3차원 상의 직선 성분이 결정되며, 이 직선 성분들은 이후의 참조 시점의 영상들의 컨투어로 각각 사영된다. 세 장의 전방향 영상의 기하학적 관계를 그림 7에 나타내었다.

그림 7과 같이 첫 번째 참조 시점의 위치 C_1 이 고정되면 두 평면 Π_0 와 Π_1 이 접하는 교선의 월드 좌표계

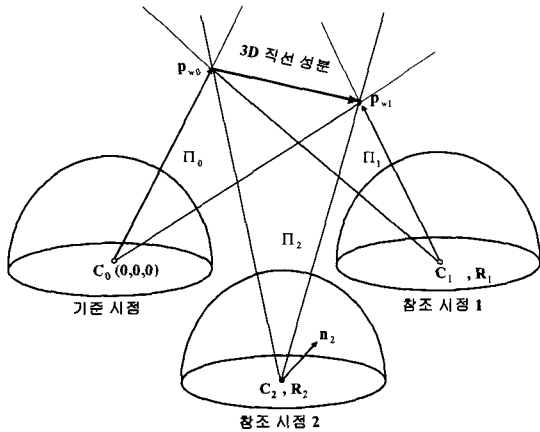


그림 7. 3장의 전방향 영상의 기하 관계
Fig. 7. Geometrical relation of 3 omnidirectional images.

상의 방향벡터 $\mathbf{p}_w (= \mathbf{p}_{w1} - \mathbf{p}_{w0})$ 가 결정되며, 두 번째 참조 시점의 3x4 카메라 행렬 \mathbf{P}_2 에 의해 다음 식 (11)과 같이 지역 좌표계로 변환하여 \mathbf{p}_2 를 표현한다. 참조 시점 2에 대응되는 컨투어로부터 평면 Π_2 의 법선 벡터 \mathbf{n}_2 를 구할 수 있으며 식 (11)을 이용해 식 (12)를 유도한다. 그리고 식 (12)를 m 개의 대응 컨투어에 대해 일반화하여 전개하면 식 (13)과 같으며 m 이 12보다 같거나 큰 경우, 식을 전개하여 svd(singular value decomposition) 방법으로 두번째 참조 시점에서의 카메라 행렬을 구할 수 있다.

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{P}_2 \mathbf{p}_w, \quad \mathbf{P}_2 = [\mathbf{R}_2 | -\mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2], \quad (11)$$

$$\mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{n}_2 = ([\mathbf{R}_2 | -\mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2] \mathbf{p}_w) \cdot \mathbf{n}_2 = 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 p_{x_i} + R_2 p_{y_i} + R_3 p_{z_i} - R_2 C_{2x} \\ R_4 p_{x_i} + R_5 p_{y_i} + R_6 p_{z_i} - R_2 C_{2y} \\ R_7 p_{x_i} + R_8 p_{y_i} + R_9 p_{z_i} - R_2 C_{2z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{x_i} \\ n_{y_i} \\ n_{z_i} \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

추정된 두번째 참조 시점의 카메라 행렬로부터 사영된 컨투어의 궤적을 계산하고, 실제 영상에 존재하는 컨투어를 식 (7)로부터 계산한다. 전방향 영상에 존재하는 실제 컨투어 $c_i(s)$ 와 추정된 컨투어 $c_i(t)$ 간의 거리 오차(D)는 다음 식 (14)로 계산된다.

$$(\Theta_1, \Phi_1, \mathbf{P}_2) = \arg \min_{\Theta, \Phi, \mathbf{P}} D(\Theta, \Phi, \mathbf{P}), \quad (14)$$

$$D(\Theta, \Phi, \mathbf{P}) = \sum_{i=1}^m D_i, \quad D_i = \int \|c_i(s) - c_i(t)\| ds$$

여기에서 \mathbf{P} 는 회전각 Θ 와 Φ 에 의해 계산된 두번째 참조 시점에서의 카메라 행렬이며, i 는 대응 컨투어의 인덱스로 총 m 개가 존재하며, $t(s)$ 는 단조 감소하지 않

는 함수(monotonic non-decreasing function)로서 $t(0) = 0$ 과 $t(1) = 1$ 값을 갖는다^[13]. 계산된 오차 D 는 추정된 전방향 카메라의 회전과 위치 정보의 정확도를 검증할 수 있는 척도(measure)로 사용된다. 초기 추정된 \mathbf{R}_1 과 \mathbf{t}_1 의 회전각 인 Θ_{init} 와 Φ_{init} 을 중심으로 최종 검색 영역의 두 배 영역을 사전에 정의한 샘플링 주기로 검색하여 거리 오차 D 가 가장 적을 때의 첫 번째 참조 시점의 회전 및 위치 정보 Θ_1, Φ_2 와 두 번째 참조 시점의 카메라 행렬 \mathbf{P}_2 를 각각 최종 결과로 결정한다.

IV. 실험 결과 및 검토

실제 영상을 대상으로 영상 내 컨투어의 양 끝점을 이용한 컨투어의 궤적 계산방법 및 추정된 카메라 모델의 정확도를 검증한다. 니콘 쿨픽스(Coolpix) 995 디지털 카메라에 시야각이 183°인 어안컨버터 FC-E8을 장착하여 사전에 준비된 교정 패턴을 1600x1200 해상도로 촬영하였다. 그리고 9개의 파라미터로 구성된 전방향 카메라 모델을 추정했으며^[9], 교정 패턴은 검은 바탕에 반경 60mm의 흰 원들로 구성된 2x3m²크기의 평판을 이용했다.

사영된 컨투어를 구성하는 양 끝점 좌표와 추정된 카메라 모델로 계산된 컨투어 궤적을 그림 8에 보였다. 입력으로 사용된 컨투어의 끝점은 붉은 원으로 표시했고, 제안된 방법에 의해 추정된 18개의 컨투어 궤적은 파란 컨투어로 나타내었다. 추정된 컨투어의 궤적이 실제 영상의 컨투어와 정확히 일치함을 확인할 수 있으



그림 8. 추정된 사영모델에 따라 계산된 컨투어
Fig. 8. Calculated contours from endpoints with estimated projection model.

표 2. 사영모델별 평균 컨투어 거리 오차 (단위: 픽셀)
Table 2. Average contour distance error on each projection model.

사영모델	A	B	C
실험 1	4.20	0.10	0.05
실험 2	6.70	0.15	0.07

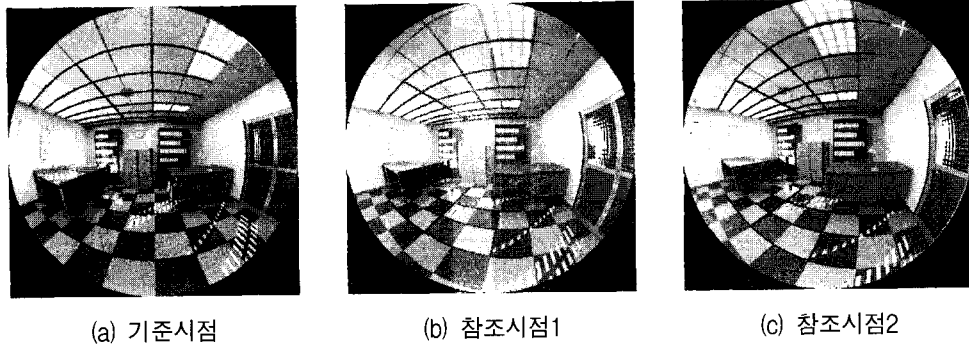


그림 9. 등거리 사영모델 전방향 입력영상
 Fig. 9. Input omnidirectional images of equidistance projection model.

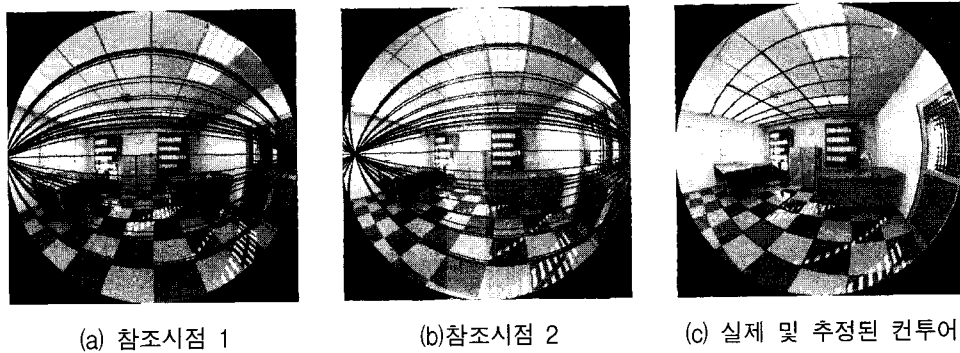


그림 10 컨투어 양 끝점(적색)과 추정된 에피폴라 곡선(청색):1단계; 실제(청색) 및 추정된 컨투어(적색):2단계
 Fig. 10. Contours' endpoints and epipolar curves; Real contours(blue) and estimated contours(red).

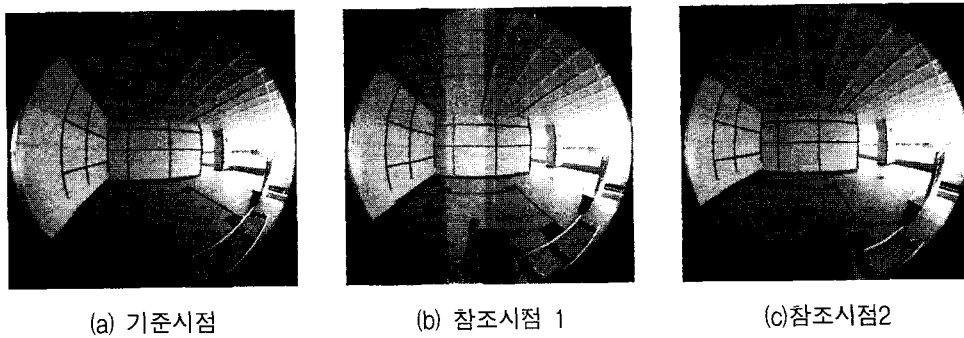


그림 11. 실제 전방향 입력 영상
 Fig. 11. Input real omnidirectional images.

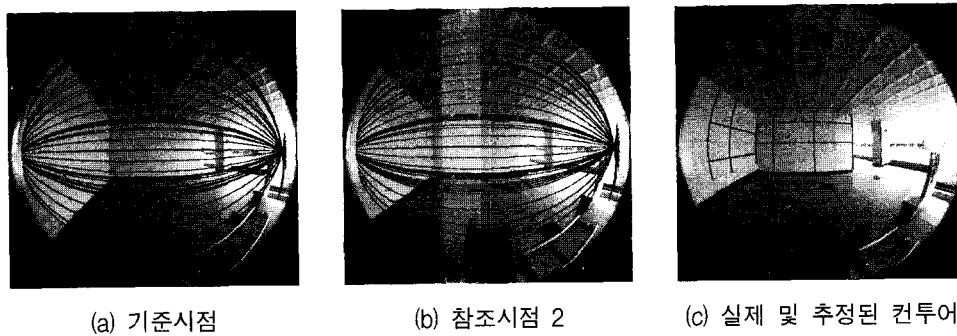


그림 12. 컨투어 양 끝점(적색)과 추정된 에피폴라 곡선(청색):1단계; 실제(청색) 및 추정된 컨투어(적색):2단계
 Fig. 12. Contours' endpoints and epipolar curves; Real contours(blue) and estimated contours(red).

며, 실제 컨투어와 계산된 결과가 서로 일치하는 정도를 정량적으로 표현하기 위해 각각 다른 장소에서 취득한 두 개의 대상 영상에 대한 사영모델에 따른 평균 컨투어 거리 오차를 표 2에 나타내었다.

실험에 이용한 사영모델 중에서 A는 등거리 사영모델이며, B는 에피폴라 기하를 이용하는 전방향 모델 추정 방법^[15], C는 3장에서 설명한 모델^[12]로서 9개의 파라미터를 사용한 방법이다. 표 1에서 보이는 바와 같이 제안된 컨투어 추정 방법을 C방법에 의해 추정된 카메라 모델에 적용하여 가장 정확한 결과가 얻어짐을 확인하였다. 표 2의 실험에서 영상에 실제로 존재하는 컨투어의 궤적을 제안된 방법을 이용해 양 끝점의 좌표값으로부터 정확하게 계산할 수 있으며, 이는 다음 단계인 사영된 컨투어의 정합 실험에 입력으로 사용된다.

제안된 알고리즘의 정확도를 검증하기 위해 POV-Ray 렌더링 소프트웨어를 이용해 카메라를 임의로 회전 및 이동시켜 얻어진 세 장의 전방향 영상(768×768)을 대상으로 실험하였다^[17]. 총 20 개의 대응 컨투어를 사용한 입력 영상을 그림 9에 나타냈으며 실험 결과는 표 3에 정리하였다. 그리고 오차 각도의 최소화를 이용한 1단계의 대략적 방법을 적용한 다음, 컨투어의 양 끝점과 추정된 R_1 과 t_1 의 회전각에 의해 계산된 에피폴라 곡선을 중첩하여 그림 9 (c)에 나타냈다. 여기에서 컨투어의 양 끝점을 나타내는 붉은 점들이 에피폴라 곡선 상에 가깝게 존재함을 알 수 있으며, 총 루프 횟수는 9회이다. 1차 초기값 추정단계에서는 두 영상간의 회전과 이동에 대한 단위 방향벡터만을 추정하여 2차 추정단계의 초기값으로 설정된다. 초기에 추정된 R_1 과 t_1 을 초기값으로 하여 $\pm 0.70^\circ \times 2$ 영역을 100등분하여 세번째 영상간의 컨투어 정합을 최소화하는 카메라 행렬을 최종 파라미터로 결정한다. 영상에 실제 존재하는 컨투어와 최종 추정된 카메라 행렬에 의해 사영된 컨투어를 중첩하여 그림 10 (c)에 보였으며, 여기에서 두 컨투어 간 거리 차이가 거의 없이 겹쳐있음을 확인할 수 있다.

본 논문의 알고리즘을 실제 영상에 적용하기 위해 Nikon 쿨픽스995 디지털 카메라에 어안컨버터FC-E8을 장착하여 III장의 전방향 영상(1600×1200)을 취득했으며, 20개의 대응 컨투어를 사용하였다 (그림 11). 카메라를 회전하지 않고 달리(dolly) 트랙에 설치하여 y축으로 이동시켰으며, 기준 시점으로부터의 참조 시점1과 2의 거리 비는 1:2로 조절하였다. 1차 초기 추정단계에서 총 루프 횟수는 9회였으며, 컨투어의 양 끝점을 나타내는 붉은 점들이 에피폴라 곡선 상에 다소 벗어나 있지만

표 3. 합성영상에 대한 컨투어 매칭 결과
Table 3. Contour matching results on synthetic images.

	R_1 (°)	C_1	R_2 (°)
입력	-10.00	(60.00, 0.00, 0.00)	-15.00°
1차 추정	-9.84	단위벡터: (1.00, 0, 0.02)	-
2차 추정	-10.13	(60.00, 0.00, -0.06)	-15.01°
	C_2	검색 영역	오차
입력	(80.00, 0.00, 20.00)	-	-
1차 추정	-	$\pm 0.70^\circ$	각도오차(E): 0.01
2차 추정	(78.79, 0.95, 19.80)	$\pm 0.01^\circ$	거리오차(D, 픽셀): 0.78

표 4. 실제 영상에 대한 컨투어 매칭 결과
Table 4. Contour matching results on real images.

	R_1 (°)	R_2 (°)	$C_1:C_2$ 거리비	검색 영역	오차
입력	0.00	0.00	1:2	-	-
1차 추정	1.40	-	-	$\pm 0.70^\circ$	각도오차(E): 0.02
2차 추정	0.00	0.40	1:1.95	$\pm 0.01^\circ$	거리오차(D, 픽셀): 0.91

비교적 가깝게 존재함을 그림 12에서 확인하였다.

추정된 R_1 과 t_1 을 초기값으로 합성영상에 대한 실험과 마찬가지로 $\pm 0.70^\circ \times 2$ 영역을 100 등분하여 컨투어 정합하였으며, 영상에 실제 존재하는 컨투어와 최종 추정된 카메라 파라미터와 실제 영상에 사영된 컨투어를 표 4와 그림 12에 각각 나타내었다. 두 컨투어 간 거리 오차가 합성영상에 비해 상대적으로 많았으며, 이는 카메라의 수평 유지, 카메라의 정확한 달리 설정 등을 포함한 실제 영상 촬영과정 및 카메라의 사영모델 추정과정 등에서 발생한다. 그러나 실험결과로부터 최종적으로 1 픽셀 이하의 아주 작은 컨투어 정합 오차를 보였으며, 그림 12 (c)에서 두 컨투어가 거의 겹쳐있음을 확인하였다.

V. 결 론

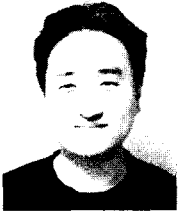
본 논문에서는 전방향 카메라의 변환 파라미터를 추정하기 위한 2단계 최소화 알고리즘이 제안되었다. 먼저, 교정 패턴을 이용해 카메라의 사영모델을 추정한다. 다음, 대응점에 대한 에피폴라 평면과 역사영된 3차원 벡터의 각도 오차함수를 최소화하는 카메라 파라미터를 계산하였다. 그리고 임의의 스케일로 카메라의 위치를 결정하여 3차원 직선 성분을 재구성하고, 이를 세 번째

영상에 사영시켜 컨투어의 거리오차를 최소화하는 이동 및 회전 파라미터를 최종적 카메라의 위치로 결정한다. 합성영상과 어안렌즈로 취득된 실제 영상의 실험결과로부터 제안된 알고리즘이 카메라 정보를 정확하게 추정함을 확인하였다. 본 연구에서는 전방향 영상내에 특징점의 초기 대응관계가 이미 설정된 경우를 고려하였다. 이후에는 컨투어의 대응관계 설정과 카메라의 위치 해석과정 등을 함께 연구하며, 3차원 공간의 재구성에 대한 연구도 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] C. Brauer-Burchardt and K. Voss, "A New Algorithm to Correct Fish-eye- and Strong Wide-Angle-Lens-Distortion from Single Images," *Proc. ICIP*, pp. 225-228, 2001.
- [2] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight Lines have to be Straight," *Machine Vision and Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 14-24, 2001.
- [3] A. Basu and S. Licardie, "Alternative Models for Fish-Eye Lenses," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 16, pp. 433-441, 1995.
- [4] Y. Xiong and K. Turkowski, "Creating image based VR using a self-calibrating fisheye lens," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.237-243, 1997.
- [5] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol.5, no.1, pp.1-12. 1999.
- [6] S. Shah and J. Aggarwal, "Intrinsic Parameter Calibration Procedure for a (high distortion) Fish-Eye Lens Camera with Distortion Model and Accuracy Estimation," *Pattern Recognition*, Vol. 29, No. 11, pp. 1775-1788, 1996.
- [7] H. Bakstein and T. Pajdla, "Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens," *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp. 60-67, 2002.
- [8] B. Micusik, "Two-View Geometry of Omnidirectional Cameras," *PhD. Thesis*, Czech Technical University, 2004.
- [9] S. Thirthala and M. Pollefeys, "Multi-View Geometry of 1D Radial Cameras and its Application to Omnidirectional Camera Calibration," *Proc. ICCV*, pp. 1539-1546, 2005.
- [10] D. Claus and A. W. Fitzgibbon, "A Rational Function Lens Distortion Model for General Cameras," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 213-219, 2005.
- [11] J. P. Barreto and K. Daniilidis, "Fundamental Matrix for Cameras with Radial Distortion," *Proc. ICCV*, pp. 625-632, 2005.
- [12] J. Kannala and S. S. Brandt, "A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and Fish-Eye Lenses," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28, No. 8, pp. 1335-1340, 2006.
- [13] J. Han and J. Park, "Contour matching using epipolar geometry," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 4, 358-370, 2000.
- [14] C. Schmid and A. Zisserman, "Automatic line matching across views," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 666-672, 1997.
- [15] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," *Cambridge Univ.*, 2000.
- [16] Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras and Q. Loung, "A robust technique for matching two uncalibrated images through the recover of the unknown epipolar geometry," *Artificial Intelligence Journal*, Vol. 78, pp. 87-119, 1995.
- [17] <http://www.ignorancia.org>

저 자 소 개



황 용 호(학생회원)
1996년 명지대학교
전자공학과 학사 졸업.
1998년 명지대학교
전자공학과 석사 졸업.
1998년 1월~2000년 3월 (주)윤익
C&C 부설연구소 연구원.

2000년 9월~2003년 7월 (주)콤텍시스템
기술연구소 주임연구원.

2003년 9월~현재 중앙대학교 첨단영상대학원
영상공학과 박사과정.

<주관심분야 : 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스 등>



이 재 만(학생회원)
2006년 중앙대학교
컴퓨터공학과 학사 졸업.
<주관심분야 : 컴퓨터비전>



홍 현 기(평생회원)
1993년 중앙대학교 전자공학과 학사 졸업.
1995년 중앙대학교 전자공학과 석사 졸업.
1998년 중앙대학교 전자공학과 박사 졸업.
1998년 9월~1999년 8월 서울대학교 자동제어특화연구센터 연구원.
1999년 9월~2000년 2월 중앙대학교 정보통신연구소 연구교수
2000년 2월~2003년 1월 Univ. of Colorado at Denver 방문연구원.

2000년 3월~현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 부교수 재직 중.

<주관심분야 : 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스 등>