전방향 카메라를 사용한 원거리 추정을 위한 파라미터 추출

*이강산, 전주일, 강현수

충북대학교 정보통신공학과

*masieno@nate.com

Camera Parameter Extraction For Long Distance Estimation Using Omnidirectional Camera

*Lee Kang-San, Jeon Joo-Il, Kang Hyun-Soo

Chungbuk National University

요약

본 논문은 전방향 스테레오 카메라를 이용한 거리 측정을 위해 반드시 수행되어야 하는 전방향 카메라의 교정방법에 관해 기술한다. 전방향 스테레오 카메라의 교정에 있어서, 두 대의 전방향 카메라를 각각 독립적으로 교정하거나 두 대의 카메라의 베이스라인이 크지 않은 경우의 교정은 기존의 연구된 다양한 방법을 통해 가능하다. 그러나 전방향 스테레오 카메라를 이용하여 원거리를 측정하기 위해서는 베이스라인이 충분히 커야 하며, 충분히 큰 베이스라인은 두 대의 전방향 카메라를 동시에 교정하는 것이 매우 힘들다. 이는 두 대의 전방향 카메라에서 촬영된 교정을 위한 테스트패턴의 크기가 최소한 한 대의 전방향 카메라에서 매우 작은 크기로 나타나기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 베이스라인이 큰 두 대의 전방향 카메라의 교정을 위한 방법을 제안하고 실험을 통해 입증한다.

1. 서론

최근 컴퓨터 비전은 산업의 각 분야에서 제조과정의 감시와 자동조립 및 로봇 등의 활용이 증대되면서 그 중요성이 강조 되고 있다. 컴퓨터 비전을 이용한 3차원 계측은 일반적으로 Stereo Vision이 널리 이용되고 있다. Stereo Vision System에 의한 3차원 계측은 반드시 카메라의 교정이 선행되어야 한다.

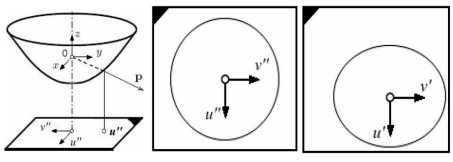
렌즈 왜곡 모델이 수반된 핀홀 카메라 모델은 다양한 광각을 가진 렌즈들을 가지고 있는 대부분의 카메라를 모델링하는데 적당하다[1][2][3]. 그러나 이 모델은 전방향 전방향 카메라에는 적합하지 않다. 반사식 또는 어안렌즈를 이용한 전방향 카메라는 약 180도 정도의 넓은 화각을 가지게 설계되어 있다. 그러므로 원근화법 투영에 의해 한정된 이미지 정도를 보여주는 모델로는 전방향 카메라를 모델링하는 것이 부적절하다. 그래서 전방향 카메라들은 구형 모델 외의 다양한 투영모델을 따르도록 설계되어 있다. 그러므로 해당 카메라에 맞는 모델을 적절히 사용하여 교정을 해야 한다[4].

카메라의 교정이란 카메라 내부의 파라미터 추정과 3차원 공간 좌표계와 카메라 좌표계의 관계를 규정하는 파라미타 추정을 말한다. 본 논문에서는 전방향 카메라의 모델을 소개하고 전방향 카메라 교정 방법에서는 테스트 패턴을 이용하여 카메라 내부파라미터와 외부파라미터를 추출하는 방법에 대해 자세히 다루게 된다. 카메라 파라미터 추출 시에 발생할 수 있는 문제점을 알아보고 보완할 대책에 대해서 제안한다.

2. 전방향 카메라 모델

전방향 카메라 모델링에서는 일반적으로 그림2에 나타난 바와 같이 카메라 영상 평면 (camera image plane) (u', v')과 센서 평면 (sensor plane) (u'', v'')정의한다. 모든 좌표계는 거울의 중심에 있는 O를 기준으로 표현되며 z축은 센서 평면의 좌표축과 일치되어 있다고 가정한다.

3차원 공간상의 한 점 X가 사영되어 센서 평면에 나타난 좌표를 $u'' = [u'', v'']^T$, 영상 평면에 나타난 좌표를 $u' = [u', v']^T$ 라고 하자.



(a) (b) (c)

그림 1. (a) 반사식 카메라의 좌표계 (b) 센서 평면 (c) 카메라 영상 평면

식(1)에 나타난 바와 같이, 센서 평면과 영상평면은 어파인 변환 (affine transformation) 관계로 표현한다.

$$u'' = Au' + t,\ A \in R^{2\times 2}, t = R^{2\times 1} \quad \text{식(1)}$$

이제 영상 사영 함수 g를 소개하도록 하자. 이 함수는 시점 O로부터 공간상의 한 점 X를 통과하는 벡터 p와 센서 평면 u'' 사이의 관계를 나타낸다(그림 1 (a)). 이러한 관계를 이용하여 전방향 카메라 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} &\lambda \cdot p = \lambda \cdot g(u'') \\ &= \lambda \cdot g(Au' + t) = PX,\ \ \lambda > 0 \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

여기서 $X \in R^4$이며 homogeneous 좌표계로 표현된다. 또한 $P \in R^{3\times 4}$로서 perspective projection matrix이다. 이 모델

에 나타난 A, t, g를 찾는 것을 흔히 카메라 교정 (camera calibration)이라고 한다. 함수 g는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$g(u'', v'') = (u'', v'', f(u'', v''))^T \quad \text{식(3)}$$

여기서 f는 센서 평면 축에 대해 대칭적임을 가정할 수 있다. 일반적으로 이 가정은 반사식 카메라와 어안렌즈에 대해 잘 성립하는 것으로 알려져 있다. 함수 f는 대한 다양한 형태가 참고문헌에 소개되어 있다[5][6][7]. 함수 f에 대한 다양한 모델이 존재하지만, 어떤 함수이든 talyor series로 근사화될 수 있다는 점을 감안하면, 이것을 다음과 같은 하나의 다항식으로 근사화할 수 있다.

$$f(u'', v'') = a_0 + a_1\rho'' + a_2\rho''^2 + \ldots + a_N\rho''^N \quad \text{식(4)}$$

여기서 계수 a_i와 다항식의 차수 N은 카메라 교정 단계에서 적절히 선택될 수 있다. 카메라 모델을 다시 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \lambda \cdot g(Au' + t) = P \cdot X, \ \lambda > 0 \quad \text{식(5)}$$

3. 전방향 카메라 교정

전방향 카메라에 있어서 교정이란, $[A, t, a_0, a_1, \cdots, a_N]$를 구하는 것을 의미한다. 구해야 하는 파라미터의 개수를 줄이기 위하여 우선 A, t를 구한다. 이는 그림 1 (b)와 (c)에 나타난 타원과 원 사이의 관계에 의하여 쉽게 구해질 수 있다. 즉, 타원 경계와 원의 경계 사이의 관계로부터 구해질 수 있다. 어파인 변환에 의해 타원을 원으로 변환하고 나면 센서 평면과 영상 평면 사이에는 $u'' = \alpha \cdot u'$의 관계로 나타낼 수 있다. 따라서 카메라 모델을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \lambda \cdot g(\alpha \cdot u') \quad \text{식(6)}$$

$$= \lambda \cdot \begin{bmatrix} \alpha \cdot u' \\ \alpha \cdot v' \\ f(\alpha \cdot \rho') \end{bmatrix}$$

$$= \lambda \cdot \alpha \cdot \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ a_0 + \ldots + a_N\rho'^N \end{bmatrix}$$

$$= P \cdot X \ , \ \lambda, \alpha > 0$$

여기서 u', v'은 영상 평면의 원의 중심을 기준으로 하였을 때의 점의 좌표, ρ'은 거리를 나타낸다. 또한 상수 α는 거리에 관련된 상수 λ와 통합될 수 있으므로 결국 $N+1$개의 파라미터 $[a_0, a_1, a_2, \cdots, a_N]$를 구하는 문제로 귀결된다.

카메라 교정 단계에서, 미리 알려진 기하를 가진 테스트 패턴들을 알려지지 않은 위치에서 촬영되는데, 이위치 정보는 센서 좌표계의 회전 행렬 $R = [r_1, r_2, r_3]$과 변위 t와 관련되며 이 회전 행렬과 변위 벡터를 외부파라미터 (extrinsic parameter)라고 부른다. 테스트 패턴 좌표계에서의 한 점을 $M_{ij} = [X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]^T$, 이에 대응하는 영상 평면 좌표계에서의 점을 $m_{ij} = [u_{ij}, v_{ij}]^T$라고 하자. 테스트 패턴 좌표계를 사용함에 따라 $Z_{ij} = 0$이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_{ij} \cdot p_{ij} = \lambda_{ij} \cdot \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \\ a_0 + \ldots + a_N\rho_{ij}^N \end{bmatrix} \quad \text{식(7)}$$

$$= P^i \cdot X = \begin{bmatrix} r_1^i r_2^i r_3^i t^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} r_1^i \ r_2^i \ t^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ 1 \end{bmatrix}$$

식(7)을 이용하여 외부 및 내부 파라미터를 구하게 된다[8][9][10][11][12].

그림 2는 전방향 카메라의 교정을 위해 촬영된 테스트패턴의 예이다.

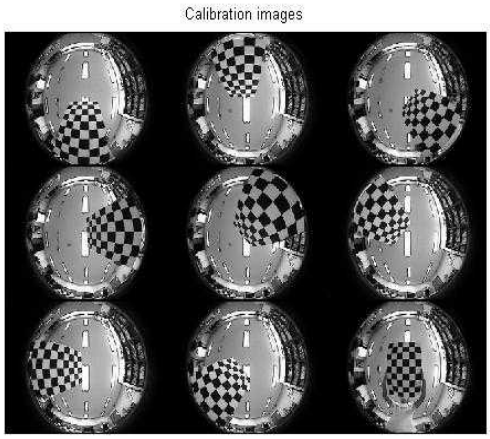
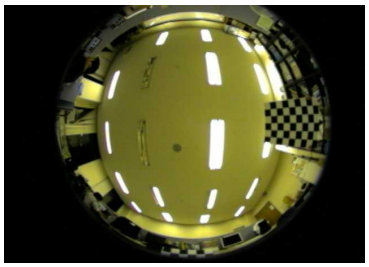
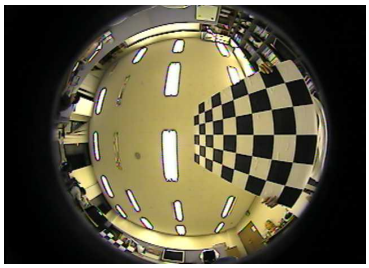


그림 2. 교정을 위한 테스트패턴 촬영영상



(a) 좌측 영상



(b) 우측영상

그림 3. 베이스라인 100㎜인 경우 촬영된 테스트패턴

4 원거리 계산을 위한 파라미터 추출

스테레오 카메라를 이용한 거리 측정에 있어서, 두 카메라간

의 거리인 베이스라인이 작을수록 거리측정의 정확도가 떨어진다. 예를 들면, 베이스라인이 0.2m일 때 disparity의 크기가 1일 때 해당 점까지의 거리가 45m이라고 하자. 이런 경우 베이스라인이 0.2m 이하인 스테레오 카메라에서는 disparity가 1 이하로 나타나므로 현실적으로 45m이상의 거리를 측정하는 것은 무리가 있다. 결국 보다 더 먼 거리를 찾아내고자 하는 만큼 카메라간의 거리(베이스라인)을 크게 하여야 하는데, 이것은 또 다른 문제를 발생시킨다. 즉, 전방향 카메라에 촬영된 테스트패턴이 매우 작아 교정에 부적절하다는 점이다. 그림 3은 1000mm의 베이스라인를 두고 촬영한 영상으로서 우측영상의 체크보드 판별은 비교적 용이하나, 좌쪽영상의 체크보드에서는 원점과 좌표를 식별하기 어렵다. 카메라간의 거리가 이보다 더 멀어 질 경우 엄청 큰 공간과 체크보드를 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결 할 수 있는 교정 방법을 제안한다.

5. 원거리 측정을 위한 파라미터 추출

본 논문에서는 앞서 말한 문제점을 해결하기 위해 근거리에서 교정한 두 대의 카메라를 바탕으로 한쪽 카메라를 베이스라인과 동일한 방향으로 이동시키고, 이동후의 파라미터를 수식적으로 유도함으로써 큰 베이스라인을 가진 스테레오 카메라의 카메라 정보를 추출하는 방법을 제안한다. 베이스라인과 동일한 방향으로 이동시키는 것은 좌측과 우측 카메라의 좌표계를 정확히 알 수 없기 때문에 실제 스테레오 카메라에서 쉽게 알 수 있는 베이스라인 방향으로 이동시킨다.

교정파라미터는 내부파라미터와 외부파라미터로 나누어지는데 내부파라미터는 카메라가 가지는 고유의 값이므로 위치를 이동해도 변하지 않을 것이다. 외부파라미터는 교정된 좌우카메라의 외부파라미터와 체크보드를 기준으로 한 월드 좌표계간의 관계로 추출할 수 있다.

먼저 교정된 외부파라미터와 월드좌표계간의 관계를 살펴보면 다음과 같다. 카메라 좌표계는 월드좌표계간에는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} X_{cam} &= R(X_3 - C) \\ &= RX_3 - RC = [R|-RC]X_w \\ &= [R|t]X_w \end{aligned} \quad \text{식(8)}$$

여기서 C는 카메라 중심좌표 벡터$(x_c, y_c, z_c)^t$이고 R은 카메라의 회전 행렬, X_w는 어떤 점의 월드 좌표를 homogeneous 좌표계로 표현한 벡터 $(x, y, z, 1)^t$이고, X_3는 X_w에서 마지막 '1'을 제외한 3차원 벡터 $(x, y, z)^t$이다. t는 월드 좌표와 카메라 좌표사이의 변위 행렬로서, $t = -RC$로 주어진다.

$$x_L = P_L X_w = [r_L|t_L]X_w = r_L X_3 + t_L \quad \text{식(9.1)}$$

$$x_R = P_R X_w = [r_R|t_R]X_w = r_R X_3 + t_R \quad \text{식(9.2)}$$

식(8)을 좌우카메라에 대입하면 식(9.1), 식(9.2)를 얻을 수 있다. 여기서 t_L, t_R 은 각각 카메라 센터 좌표와 회전행렬의 곱의 역수이고, x_L, x_R 은 식(8)에서 X_{cam}에 해당한다.

$$X_3 = r_L^{-1}(x_L - t_L) \quad \text{식(10)}$$

$$\begin{aligned} x_R &= r_R X_3 + t_R = r_R r_L^{-1}(x_L - t_L) + t_R \\ &= r_R r_L^{-1}(x_L - [t_L - (r_R r_L^{-1})^{-1} t_R]) \\ &\equiv R_{LtoR}(x_L - C_{LtoR}) \end{aligned} \quad \text{식(11)}$$

where $R_{LtoR} = r_R r_L^{-1}$, $C_{LtoR} = t_L - (r_R r_L^{-1})^{-1} t_R$

식(9.1)을 식(10)과 같이 정리해서 식(9.2)에 대입하면 식(11)로 정리할 수 있다.

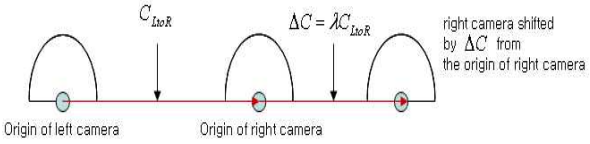


그림 4. 카메라 이동 모델

그림4는 베이스라인 방향으로 우측 카메라를 이동한 경우를 보여준다. C_{LtoR}과 동일한 방향으로 ΔC 만큼, 즉 λC_{LtoR}만큼 이동되었다고 하자. 여기서 λ는 상수이다. 이때 옮겨진 카메라의 카메라 행렬을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_R' &= R_{LtoR}(x_L - [C_{LtoR} + \Delta C]) \\ &= R_{LtoR}(x_L - C_{LtoR}) - R_{LtoR}\Delta C \\ &= x_R - \lambda R_{LtoR} C_{LtoR} \\ &= P_R X_w - \lambda R_{LtoR} C_{LtoR} \\ &= r_R X_3 + t_R - \lambda R_{LtoR} C_{LtoR} \\ &\equiv r_R' X_3 - t_R' \end{aligned} \quad \text{식(12)}$$

여기서 x_R'는 옮겨진 카메라의 중심이고, r_R'는 회전행렬로서 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_R' &= r_R, \; t_R' = \lambda R_{LtoR} C_{LtoR} - t_R \\ &= \lambda r_R r_L^{-1}(t_L - (r_R r_L^{-1})^{-1} t_R) - t_R \\ &= \lambda r_R r_L^{-1} t_L - (\lambda + 1) t_R \end{aligned} \quad \text{식(13)}$$

$x = PX$이므로 $x_R' = P_R' X_w = [r_R'|t_R']X_w$ 이고 외부파라미터 P_R'는 식(14)와 같다.

$$P_R' = [r_R| \; \lambda r_R r_L^{-1} t_L - (\lambda + 1) t_R] \quad \text{식(14)}$$

이와 같이 이동된 카메라의 내부와 외부 파라미터를 계산 할 수 있다.

6. 실험 결과

카메라 두 대를 각각 0.2m와 1m의 베이스라인간격으로 두고 15m와 30m의 거리에 있는 건물을 대상으로 실험 하였다. 카메라 행렬과 시차정보를 이용하여 분할된 물체를 구성하는 점들의 평균 거리를 계산함으로써 거리를 알 수 있다. 이러한 거리를 알기 위해서 실험에 사용된 카메라 정보를 필요로 하는 정보를 얻기 위해 카메라 행렬을 구해야 한다. 0.2m인 경우는 기존이 교정방식으로 교정을 수행하고 1m인 경우에는 0.2m를 기반으로 제안된 수식을 적용하였다. 각 그림의 특징 점의 좌표를 포토샵을 이용하여 눈으로 확인하여 8점의 평균으로 Disparity를 구하였다.

실험을 해본 결과 표1에 나타난 것과 같이 베이스라인 0.2m에서는 실거리 15m에서는 6.47%의 오차율로 양호한 결과가 나왔지만 30m에서는 100%가 넘는 오차를 보인다. 파라미터 추출 식을 이용한 베이스라인 1m의 실험 결과에서는 15m일 때 0.93%, 30m

일 때, 4%의 오차율로 실제 교정한 파라미터로 추정한 결과보다 적은 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 여기서 오차는 (실거리-추정거리)/실거리 X 100 으로 계산하였다.

그림 7. 15m 0.2m 좌우 영상

그림 8. 15m 1m 좌우 영상

그림 9. 30m 0.2m 좌우 영상

그림 9. 30m 1m 좌우 영상

표 1. 거리 추정 결과

건물과의 거리 (m)	베이스 라인 (m)	disparity (pixel)	추정된 거리 (m)	오차 (%)
15	0.2	3.5	15.97	6.47
	1	16.35	14.86	0.93
30	0.2	0.8	60.87	102.9
	1	7.8	31.20	4

7. 결론

전방향 스테레오 카메라를 이용한 거리추출을 위해서는 카메라 교정이 필수적이다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 두 대의 카메라를 동시에 교정하기 위해서는 공간적 제약이 따른다. 또한, 제한된 공간에서의 교정으로는 추출할 수 있는 거리에는 한계가 있다. 이 한계를 보완하기 위해 제안한 수식을 사용하여 생성해낸 새로운 교정 파라미터를 이용하면 작은 베이스 라인으로 교정한 카메라 쌍으로 추출할 수 있는 거리보다 더 먼 거리를 추출해 낼 수 있다.

향후 추출된 거리의 정확성 향상과 다른 모델의 전방향 카메라 교정에 대해 연구해볼 가치가 있다.

감사의 글

"이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 지원을 받아 수행된 연구임" (지역거점연구단육성사업 / 충북BIT연구중심대학육성사업단)

참고문헌

[1] Duane C. Brown, "Close - range Camera Calibration", photogrammetric Engineering 1971.

[2] Heikkla, J. "Geometrix camera calibration using circular control point", TPAMI, 22(10), 1099-1077, 2000

[3] Swaminathan, R. and Nayar, S. K. "Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras", TPAMI, 22(10), 1172-1178, 2000

[4] Miyamoto, K. "Fish eye lens", Journal of the optical Society of America, 54(8):1060-1061, 1964

[5] B.Micusik, T.Pajdla. "Paracatadioptric Camera Auto-calibration from Epipolar Geometry". ACCV 2004, January 2004.

[6] J. Kumler and M. Bauer. "Fisheye lens designs and their relative performance"

[7] B.Micusik, D.Martinec, and T.Pajdla. "3D Metric Reconstruction from Uncalibrated Omnidirectional Images". ACCV'04, Jan. 2004.

[8] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, "A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion," IEEE international conference on Computer Vision Systems, 2006.

[9] T. Kanade , M. Okutomi, "A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 16 no. 9, pp. 920-932, Sept. 1994.

[10] J. S. Ohm, E. Izquierdo, "An Object-Based System for Stereoscopic Viewpoint Synthesis", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 7, no. 5, pp. 801-811, Oct. 1997.

[11] E. Izquierdo, "Stereo Matching for Enhanced Telepresence in Three-Dimensional Video communications", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 7, no. 4, pp. 629-643, August 1997.

[12] M. Okutomi, T. Kanade, "A Multiple-baseline Stereo", IEEE Trans. on PAMI, vol 15. no. 4, pp. 353-363, April 1993.