

벡터내적 기반 카메라 외부 파라미터 응용: 카메라와 레이저스캐너간의 캘리브레이션

전재춘[†] · Shankar Sastry

UC Berkeley-EECS

Camera Exterior Parameters Based on Vector Inner Product Application: Exterior Calibration of a Camera and a Range Finder

Jaechoon Chon[†] and Shankar Sastry

UC Berkeley-EECS

Abstract : The equation based on vector inner product by the angles between pairs of two image rays can independently separate the position and pose of a camera. As our second application, the exterior calibration between a camera and a laser range finder is proposed here through analysis of surfaces created by the equation.

Key Words : Inner Production, Camera exterior parameters, Range finder.

요약 : 영상의 두점과 카메라 초점을 지나는 벡터들간의 사잇각을 기반한 방정식은 카메라 위치와 자세가 독립적으로 분리시킬 수 있다. 본 논문은 이 방정식의 두번째 응용으로써, 벡터내적 기반 방정식에 의해 생성된 곡면 분석을 통한 카메라와 레이저 라인 스캐너간의 상대적인 외부표정 계산을 소개한다.

1. 서론

카메라 외부표정을 추정하기 위해 사용되는 공선조건식(Collinear conditions)은 100여년 전부터 사진측량분야에서 기본적으로 사용되고 있으며, 최근 디지털 카메라의 일반화로 컴퓨터비전, 로봇비전, 컴퓨터그래픽스, GIS (Geographic Information System), ITS (Intelligent Transportation Systems) 등에 널리 사용되고 있다(Mikhail 외 2인, 2001).

$$u = f \frac{U}{W}, v = f \frac{V}{W} \quad (1)$$

여기서, $\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = R_Z R_Y R_X \begin{bmatrix} X - X_C \\ Y - Y_C \\ Z - Z_C \end{bmatrix}$, (u, v) 영상좌표, $P[X Y Z]^T$ 물체의 3차원좌표, $P_C[X_C Y_C Z_C]^T$ 와 $\Omega_C[\omega \phi \kappa]^T$ 는 각각 카메라의 위치와 자세이며, f 는 카메라 초점, $R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$, $R_Y = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$, and $R_Z = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 는 각각 X, Y, Z 축의 회전행렬이다. 지상기준점(GCP: Ground Control Point)을 기반한 절대표정(absolute orientation), 위성영상 또는 항공영상으로부터 정사영상(ortho-image)을 만들기 위한 DLT (Direct Linear

2007년 8월 21일 접수 ; 2007년 12월 26일 수리.

[†] 교신저자: 전재춘(jcchon@eecs.berkeley.edu or jjc7151@hanmail.net)

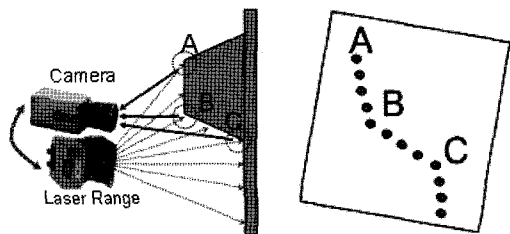
Transform)(Ahn 외 2인, 2001), 두 영상의 상대표정(relative orientation)을 위한 광속조정법(bundle adjustment)(Mikhail 외 2인, 2001; Hartly and Zisserman, 2000), 연속된 3프레임 영상을 이용한 triple let 또는 factorization(전재춘과 서용철, 2004), 3차원 좌표가 없는 광류와 3차원 좌표가 주어진 물체가 촬영된 다수의 영상프레임의 외부표정 및 광류의 3차원 좌표 계산하는 광속블락조정법(bundle block adjustment)(Mikhail 외 2인, 2001), 광속블락조정법을 연속된 영상프레임에 응용한 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)(Durrant-Whyte and Baily, 2006), 모두 공선조건식을 기반으로 하고 있다. 공선조건식에서 카메라의 이동과 회전은 비선형적인 관계로 독립적으로 분리할 수 없는 요소이다. 카메라의 속도와 각속도 개념을 도입한 Longuet-Higgins 방법도 카메라의 이동(속도)과 회전 성분(각속도)이 비선형적으로 연결되어 있다(Longuet-Higgins, 1984). 그의 카메라 모션과 관련된 계산법으로는 두 영상간의 에피폴라라인(epipolar line)을 계산하기 위한 공면조건식(coplanar condition)(Mikhail 외2인, 2001; Hartly and Zisserman, 2000), 평면 또는 곡면 외평에 사용되는 어파인 변환(affine transform)이 있다. 공선조건식 기반 절대표정을 계산시, 비선형 연립방정식 풀이가 필요하다. 이 연립방정식 풀이과정에서 외부표정 초기 입력값에 따라 수렴 또는 발산이 결정된다. 따라서, 초기값 설정이 중요하다.

초기 입력값이 근접영역과 원거리영역에서 촬영된 영상에 대하여 각각 지구 반지름과 지구와 달거리가 되어도 강인하게 카메라 외부표정을 추정하는 벡터내적 기반 조건식을 첫번째 응용으로써 그 결과를 보였다(전재춘과 Sastry, 2008). 제안한 조건식을 통한 응용중에서, 카메라와 레이저스캐너간의 캘리브레이션에 적용하였다; 1. 절대표정, 2.곡면해석을 통한 카메라와 레이저 라인 스캐너와 캘리브레이션, 3. 카메라 자세추정 없이 3차원 데이터 생성, 4. 2D/3D라인 일치화를 통한 3차원 점군(3D point cloud)에 영상등록, 5. 광속블락조정법과 SLAM.

카메라와 레이저 라인 스캐너를 포함하는 시스템이 최근 네비게이션 응용을위한 로봇, 3차원 GIS 데이터를 위한 모바일 매핑 시스템등에 널리 사용되고 있다(그림1



(a) 동경대학 모바일매핑시스템 (b) UC버클리 자율주행로봇
그림 1. 카메라와 레이저스캐너를 장착한 시스템.



(a) 카메라와 레이저스캐너의 물리적 관계 (b) 영상상에서 레이저스캐너 데이터

그림 2. 카메라와 레이저스캐너의 관계.

참조)(Zhao and Shibasaki, 2003; Fruh and Zakhor, 2003). 레이저 라인 스캐너는 그림 2(a)와 같이 180도 FOV(Field Of View)인 한 라인상의 거리 데이터를 취득할 수 있다. 이 시스템에서 중요한 요소가 카메라와 레이저스캐너간의 상대적인 외부표정이다. 이 외부표정이 3차원 데이터와 영상데이터 간의 정밀도를 결정지를 중요한 요소이다. 레이저스캐너 데이터를 이용하여 카메라 외부표정 계산하는 것은 광속조정법을 통하여 계산하는 것과 동일하지만(Mikhail 외 2인), 그림 2(b)와 같이 영상에 투영된 레이저스캐너 데이터는 영상 전체에 잘 분포되어 있지 않아, 초기값이 실제값과 매우 유사할지라도 공선방정식 기반 광속조정법은 발산을 하기 때문에, 적용이 용이하지 않다. 이 문제를 해결하기 위해 Robert과 Zhang은 자세와 위치를 변화시킨 패턴보드가 촬영된 다수의 영상프레임과 변화시킨 패턴보드상의 레이저 데이터를 사용하여 최적의 상대적인 외부표정을 찾는 연구를 수행했다(Zhang and Pless, 2004). Mei와 Rives는 촬영 가능한 레이저 데이터에서 라인상에 존재하는 데이터와 영상에서 추출한 라인간의 일치화를 통하여 파노라마 카메라와 레이저스캐너간의 상대적 외부표정을 추정 하였다(Mei and Rives, 2006). 이 두연구는 카메라 외부표정인 6개의 미지수를 동시에 추정하기 때문에 센서 노이즈, 초기값 등에 민감하는 단점이 있으며, 많은 영상프레임과 레이저스캐너

데이터쌍이 필요로 한다.

본 논문에서는 벡터내적 기반 조건식의 두번째 응용으로써, 최소 3쌍의 영상과 레이저스캐너 데이터를 이용하여, 카메라의 위치와 자세를 각각 분류하여 강인하게 계산하는 새로운 방법을 제안 하였다. 카메라 초점을 지나는 3쌍의 벡터는 3개의 내적을 만들 수 있다. 이 내적은 카메라의 자세와 독립적이다. 각 내적은 공간상에서 곡면으로 표현된다. 3개의 곡면은 오직 한점에서 만나며, 이점은 카메라의 위치를 뜻한다. 본 논문에서는 카메라 위치를 찾기위해 2차원 히스토그램방법을 제안 하였다.

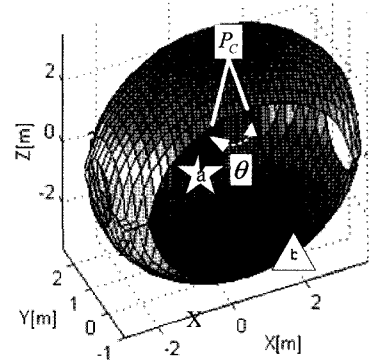


그림 4. 곡면상의 카메라 위치.

2. 벡터내적 기반 조건식

카메라 초점 $P_C[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ 와 공간상의 점을 지나는 벡터들의 사잇각 θ 는 카메라 자세 $\Omega_c[\omega \ \phi \ \kappa]^T$ 와 관련 없이 일정 한 것을 나타내고 있다. 우리는 이 조건으로 카메라의 위치와 자세를 각각 분리하여 추정 할 수 있다. 그림 3에서, 공간상의 점 $a[X_a \ Y_a \ Z_a]^T$ 와 $b[X_b \ Y_b \ Z_b]^T$ 를 기준으로 벡터 \vec{a} 와 \vec{b} 의 사잇각 θ 값이 고정 될때, 카메라 초점 P_C 는 그림 4와 같이 곡면상에 존재한다. 이 곡면은 다음식인 벡터내적으로 표현된다.

$$F = \vec{a} \cdot \vec{b} - |\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta = 0 \quad (2)$$

여기서, $\vec{a} = (X_a - X_C \ Y_a - Y_C \ Z_a - Z_C)$, $\vec{b} = (X_b - X_C \ Y_b - Y_C \ Z_b - Z_C)$, $|\vec{a}| = \sqrt{(X_a - X_C)^2 + (Y_a - Y_C)^2 + (Z_a - Z_C)^2}$, $|\vec{b}| = \sqrt{(X_b - X_C)^2 + (Y_b - Y_C)^2 + (Z_b - Z_C)^2}$ 이다. 곡면은 벡터 \vec{a} , \vec{b} 와 사잇각 θ 값에 따라 반지, 럭비공과 같이 변한다.

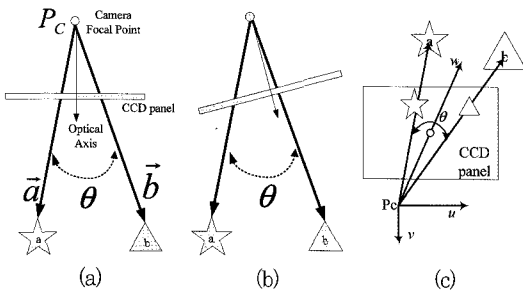


그림 3. 카메라 자세와 벡터간의 사잇각의 관계.

3. 곡면해석을 통한 카메라 위치결정

식(2)에서 (X_C, Y_C) 을 입력으로 Z_C 로 출력하여 곡면을 표현하기 위해서는 양변을 제곱하여 다음과 같이 4차식으로 만들어야 한다.

$$AZ_C^4 + BZ_C^2 + C = 0 \quad (3)$$

여기서, $A = 1 - \cos^2\theta$, $B = 2K - (K_a + K_b)\cos^2\theta$, $C = K^2 - K_a K_b \cos^2\theta$, $K = (X_a - X_C)(X_b - X_C) + (Y_a - Y_C)(Y_b - Y_C)$, $K_a = (Y_a - Y_C)^2 + (Z_a - Z_C)^2$, $K_b = (Y_b - Y_C)^2 + (Z_b - Z_C)^2$ 이다. 식(3)에서 Z_C 는 2차방정식 제곱근 풀이를 통하여 계산 할 수 있다.

$$Z_C = \pm \sqrt{\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (4)$$

Z_C 의 값이 복소수일 때는, 카메라 초점이 존재할 수 없는 위치를 뜻한다. 벡터의 사잇각 θ 는 공간상의 두점 a , b 와 일치하는 영상 두점 $I_a(x_a, y_b)$, $I_b(x_b, y_b)$ 와 카메라 초점을 지나는 벡터 \vec{I}_a 와 \vec{I}_b 의 내적 $\theta_{image} = \cos^{-1} \frac{\vec{I}_a \cdot \vec{I}_b}{|\vec{I}_a||\vec{I}_b|}$ 를

이용하여 계산할 수 있다. 카메라의 위치 $P_C[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ 를 결정 하기 위해서는 최소 3개의 곡면이 필요로 한다. 그림 5(a)와 같이 두 곡면이 만날때 교차하면, 하나의 곡선에서 만나며, 그림 5(b)와 같이 3개의 곡면이 교차하면, 하나의 점에서 만나게 된다.

비선형 방정식 풀이 기법을 이용하여 식(2)에서 카메라의 위치를 추정 할 수 있다. 하지만, 그림 2(b)와 같이 레이저스캐너 데이터가 영상에 고루분포하지 않기에, 추정을 위한 초기 입력 값에 따라 발산하거나 수렴한다. 본 논문에서는 초기 입력값과 무관한 2차원 히스토그램

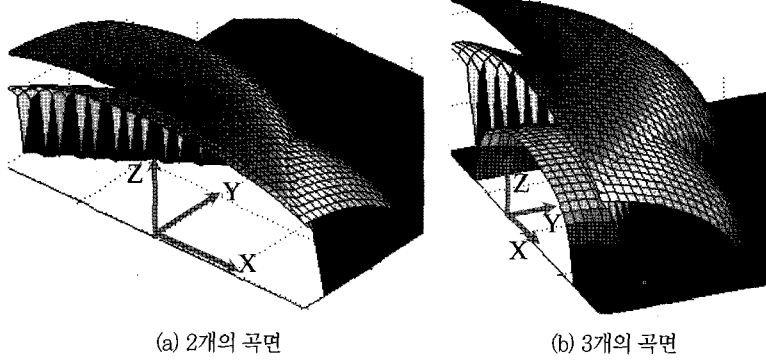


그림. 5. 곡면 교차에 의한 카메라 위치결정, XY평면을 n×m셀로 나눌경우, 각 셀은 (Xc, Yc)해당된다.

을 방법을 사용 하였다. 2차원 히스토그램 방법은 X,Y 축을 n×m의 셀로 나누어 각 셀의 중심(X,Y)에 해당하는 Z 값들을 비교 한 후, 근접한 Z 수가 가장 많은 셀을 카메라 위치로 결정 하는 것 이다. 비교하는 방법은 주어진 임계값 보다 작으면 두 곡면이 만나는 것을 뜻하고 그와 반대의 경우는 만나지 않는 것을 뜻한다. 그림 6은 그림 5(b)에 대한 2차원 히스토그램 결과이다. 그림에서 가장 많이 만나는 셀을 선택하면 카메라 위치가 결정 되는 것이다.

임계값에 따라서 그림 6에서 지역A부분이 높은 값을 가질 수가 있다. 이 문제를 해소하기위, 본 논문에서는 SUSAN 에지를 사용하였다(Smith and Brady, 1997; 전재춘과 서용철 2004). 그림6의 히스토그램을 SUSAN에 입력하게 되면 지역A부분은 사라지며, 실제 카메라 위치와 관련된 셀만 남게 된다. 카메라 Z위치를 결정하기위해, 선택된 카메라 위치 XY에 대한 각 곡면의 Z를 메디안(median) 필터에 입력하여 결정 하였다.

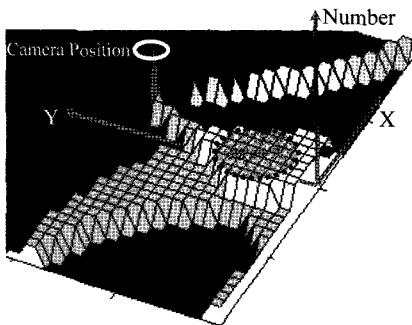


그림. 6. 카메라 위치 결정을 위한 2차원 히스토그램.

4. 카메라 투영식에 의한 카메라 자세

카메라의 자세 $\Omega c[\omega \phi \kappa]^T$ 는 카메라 투영식에 결정된 카메라 위치와 카메라와 레이저스캐너 데이터 $(X_{Laser}, Y_{Laser}, Z_{Laser})$ 를 입력하여 추정 할 수 있다(전재춘과 Sastry, 2008).

$$\begin{aligned} F_x &= f \frac{U}{W} + x_0 - x \\ F_y &= f \frac{V}{W} + y_0 - y \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, (x_0, y_0) 는 카메라 투영중심(principal point)이다. 영상과 레이저스캐너 데이터 취득시에러가 발생 할때는 3장에서 소개된 알고리즘을 적용해도 2차원 히스토그램상에서 여러 셀이 카메라 위치후보로 나타나게 된다. 이 경우에는 $\Sigma(|F_x| + |F_y|)$ 가 최소인 셀을 카메라 XY로 설정하였다.

4. 실험결과

제안한 방법을 그림 7, 8과 같이 실내와 실외 실험에 적용하였다. 영상의 크기는 2112×2816[pixel]이며, 각 카메라의 내부표정은 그림 7(c)과 8(b)와 같이 패턴보드를 사용 하였다(Brown, 1971; Tsai, 1984; Zhang, 2000; MATLAB open code).

실내에서 실험한 경우, 레이저스캐너를 사용하지 않고, 그림 7(b)와 같이 실측한 데이터를 사용하였다. 실측한 데이터는 레이저스캐너와 동일하게 일정한 높이에서 각 대상물의 코너의 값을 사용하였다. 그림 7(d)는 추출

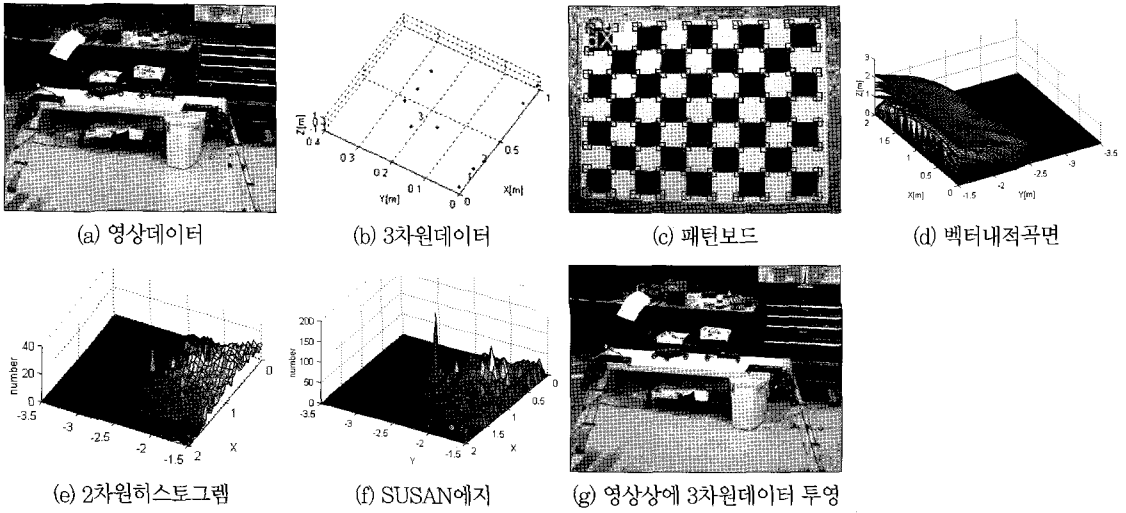


그림 7. 실내실험.

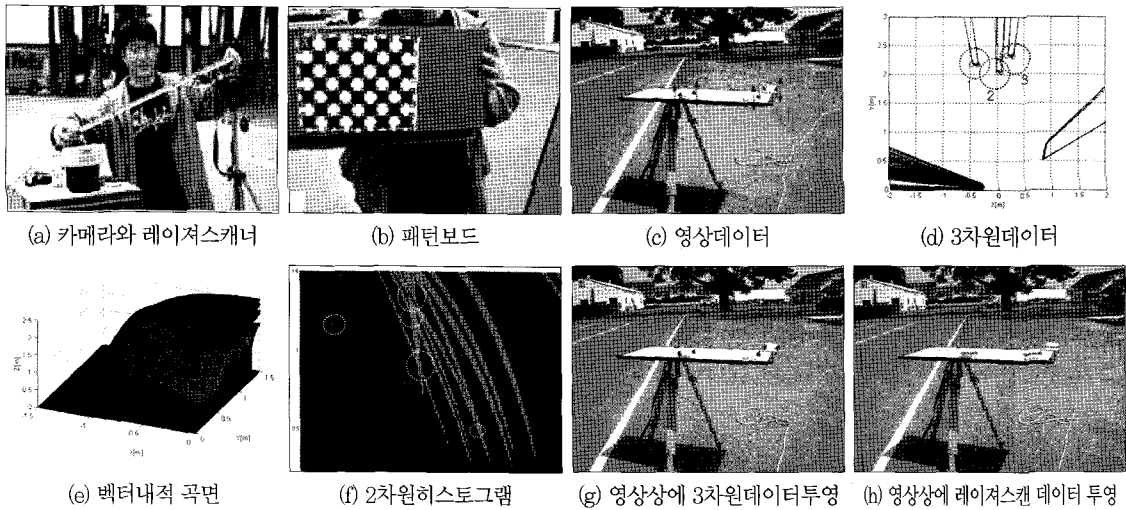


그림 8. 실외실험.

된 7쌍의 2/3차원 데이터쌍에 따라 생성된 곡면들을 보여주고 있으며, 그림 7(e)와 7(f)는 각각 2차원 히스토그램과 SUSAN에지 결과이다. 히스토그램의 XY축은 1[cm]의 정밀도이다. 각 셀에서 평면이 만나는 조건의 Z값의 임계값은 2[cm]를 사용하였다. 그림 7(g)는 계산된 카메라 위치와 자세를 이용하여 3차원 데이터를 영상에 투영한 결과이며, 평균에러는 3.2[pixel]이다.

실외에서 실험한 경우엔, 그림 8(a)와 같이 레이저스캐너를 사용하였다. 레이저스캐너 데이터를 영상데이터와 일치하는 쌍을 찾기 쉽게 하기위해, 그림 8(c)와 같이 평면위에 3개의 물체를 올려 놓았다. 추출시 에러를 줄

이기 위해 되도록 레이저스캔 평면과 평판이 평행하도록 해야한다. 본 논문에서 이용한 데이터는 야외미풍으로 인하여 레이저스캐너 데이터 에러가 있으며, 그림 8(c)와 같이 영상에서 상하방향으로 영상에서 추출된 데이터는 에러를 포함하고 있다. 이러한 이유로 그림 8(f)의 2차원 히스토그램상에서 점선원은 카메라 후보가 맞고 있다. 히스토그램의 XY축은 4[cm]의 정밀도이다. 각 셀에서 평면이 만나는 조건의 Z값의 임계값은 10[cm]를 사용하였다. 그림 8(g)와 8(h)는 4장에 소개하는 방법을 통하여 최소에러를 가지는 후보를 카메라 위치로 설정할때 결과이며, 평균에러는 5.4[pixel]이다.

5. 결론

본 논문에서는 카메라의 위치를 계산하기 위한 벡터내적 기반인 조건식을 공간상에서 곡면으로 표현하여, 곡면이 만나는 점을 2차원 히스토그램으로 찾아내는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 카메라 위치 초기치 값에 따라 발산하거나 수렴하는 문제를 피할 수 있는 장점이 있다.

제안한 방법은 카메라와 레이저스캐너간의 상대적인 위치 실측이 어려운 경우에 적용이 용이 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 전재춘 · 서용철, 2004. 3차원 다중 기선을 사용한 비데오 영상 모자이크 기술, 한국원격탐사학회지, 20(2): 125-137.
- 전재춘 · S. Sastry, 2008. 벡터내적기반 카메라 외부 파라미터, 응용: 절대표정, 제어로봇시스템학회지, 14(1): 70-74.
- Ahn, C., S. Cho, and J. Chon, 2001. Ortho-rectification software applicable for IKONOS high resolution images: GeoPixel-Ortho, IGARSS 2001, pp. 555-557, Sydney.
- Brown, D. C., 1971. Close-Range Camera Calibration, *Photogrammetric Eng.*, 37(8): 855-866.
- Camera calibration open MATLAB code, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- Durrant-Whyte, H. and T. Bailey, 2006. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part I, *Robotics and Automation Magazine*, pp. 99-108, June.
- Fruh, C. and A. Zakhor, Data processing algorithms for generating textured 3D building façade meshes from laser scans and camera images, in *Proc. 3D Data Process., Vis. and Transmission*, Padua, Italy, 2002, pp. 834-849.
- Hartly, R. I. and A., 2000. Zisserman, Multiple view geometry, Cambridge University Press, UK.
- Longuet-Higgins, H. C., 1984. The visual ambiguity of a moving plane, *Proc. R. Soc. London B*, p. 223.
- Mei, C. and P. Rives, 2006. Calibration between a Central Catadioptric Camera and a Laser Range Finder for Robotic Applications, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, pp. 532-537.
- Mikhail, E. M., J. S. Bethel, and J. C. McGlone, 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*, Hoboken, NJ: Wiley, pp. 80-151.
- Smith, S. M. and J. M. Brady, 1997. SUSAN - a new approach to low level image processing, *IJCV*, 23(1): 45-78.
- Tsai, R. Y., 1986. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. *Proceedings of IEEE Conference on CVPR*, Miami Beach, FL, pp. 364-374.
- Zhang, Q. and R. Pless, 2004. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration), *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, pp. 2301-2306.
- Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. on PAMI*, 22(11): 1330-1334.
- Zhao, H. and R. Shibasaki, 2003. A vehicle-borne urban 3D acquisition system using single-row laser range scanners, *IEEE Trans. on SMC-B*, 33(4): 658-666, Aug.