

차선검출 기반 카메라 포즈 추정

정 호 기^{*1)} · 서 재 규²⁾

한양대학교 자동차전자제어연구소¹⁾ · 한양대학교 미래자동차공학과²⁾

Lane Detection-based Camera Pose Estimation

Ho Gi Jung^{*1)} · Jae Kyu Suhr²⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

²⁾The Research Institute of Automotive Control and Electronics, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 14 August 2014 / Revised 16 March 2015 / Accepted 29 May 2015)

Abstract : When a camera installed on a vehicle is used, estimation of the camera pose including tilt, roll, and pan angle with respect to the world coordinate system is important to associate camera coordinates with world coordinates. Previous approaches using huge calibration patterns have the disadvantage that the calibration patterns are costly to make and install. And, previous approaches exploiting multiple vanishing points detected in a single image are not suitable for automotive applications as a scene where multiple vanishing points can be captured by a front camera is hard to find in our daily environment. This paper proposes a camera pose estimation method. It collects multiple images of lane markings while changing the horizontal angle with respect to the markings. One vanishing point, the cross point of the left and right lane marking, is detected in each image, and vanishing line is estimated based on the detected vanishing points. Finally, camera pose is estimated from the vanishing line. The proposed method is based on the fact that planar motion does not change the vanishing line of the plane and the normal vector of the plane can be estimated by the vanishing line. Experiments with large and small tilt and roll angle show that the proposed method outputs accurate estimation results respectively. It is verified by checking the lane markings are up right in the bird's eye view image when the pan angle is compensated.

Key words : Camera calibration(카메라 캘리브레이션), Pose estimation(포즈 추정), Lane detection(차선검출), Vanishing point(소실점), Vanishing line(소실선)

1. 서론

카메라 캘리브레이션(camera calibration)은 3차원 공간상의 한 점이 영상 상의 한 점으로 투영되는 과정에 관련된 매개변수(parameter)들을 추정하는 과정이다.¹⁾ 일반적으로, 어안렌즈 왜곡을 무시하면, 3차원 공간상의 점 P(X, Y, Z)와 그 상(image) p(u, v)는 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

P에 곱해진 첫 번째 행렬은 원근투영(perspective projection)을 모델링한 것이고, 두 번째 행렬은 실제 세계 좌표계로(world coordinate system)부터 카메라 중심 좌표계의 변환을 모델링한 것이다. 첫 번째 행렬은 픽셀(pixel) 단위 초점거리(focal length) α_u, α_v , 주점(principal point) (u_0, v_0) 등 내부 매개변수(int-

*Corresponding author, E-mail: hogijung@hanyang.ac.kr

rinsic parameter)를 포함하고 있고, 두 번째 행렬은 실세계 좌표계와 카메라 중심 좌표계 사이의 회전 변환 행렬 $R_{3 \times 3}$ 과 병진 벡터(translational vector) $T_{3 \times 1}$ 등 외부 매개변수(extrinsic parameter)를 포함한다. 이때, 3차원 좌표계는 오른쪽을 X 축, 아래쪽을 Y 축, 앞쪽을 Z 축으로 하고, 각 축에 대한 회전각을 틸트각(tilt angle), 팬각(pan angle), 롤각(roll angle)이라고 한다. 2차원 좌표계는 오른쪽을 u 축, 아래쪽을 v 축으로 한다.

일반적으로 내부 매개변수는 캘리브레이션 패턴(calibration pattern)이라고 불리는 격자무늬의 평면을 다양한 각도에서 촬영한 여러 장의 영상을 활용하여 용이하게 추정할 수 있기 때문에,²⁾ 자동차용 카메라의 경우 외부 매개변수를 추정하는 것이 주요 관심사이다.³⁾ 특히, 병진 벡터는 카메라의 장착 위치에 대한 측정으로 비교적 간단히 추정할 수 있고 그 오차의 영향도 크지 않은데 반해, 카메라의 장착 각도(이하, 포즈로 언급)는 측정도 어렵고 작은 오차도 심각한 문제를 일으키기 때문에, 카메라 포즈에 대한 정밀한 캘리브레이션은 자동차용 비전을 연구하는 연구자들의 큰 관심사라고 할 수 있겠다.⁴⁾

양산 과정의 캘리브레이션은 일반적으로 카메라 장착기구를 이용하여 포즈를 제한할 수 있다고 가정하고(예를 들면, 카메라는 수평으로 장착된다고 가정하고) 정교하게 설계된 시설이나 기구를 사용하기 때문에, 임의의 카메라 포즈를 추정하는 데 사용할 수 없다.⁵⁾ 이를 위해 일반적으로 사용되는 방법은 Fig. 1과 같이, 지표면에 매우 큰 캘리브레이션 패턴을 그리거나 펼치고 이를 촬영한 영상을 사용하여 외부 매개변수를 동시에 추정하는 방법이다.^{3,6)} 하지만, 이와 같은 방법은 대형 캘리브레이션 패턴을 제작하고 설치하기 어려운 문제점이 있다. 더욱이, 현실적으로 캘리브레이션 패턴의 크기와 길이가 제한될 수밖에 없기 때문에, 원거리에 대한 정보가 부족하고 이는 포즈 추정의 정확성을 저하시킨다. 또, 한 장의 영상만을 사용해야 하기 때문에, 잡음에 강인한 추정방법을 사용할 수 없는 문제점도 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 두 가지 접근법이 제안되었다. 첫째는 복수의 소실점(vanishing



Fig. 1 Calibration pattern-based extrinsic parameter estimation needs a huge calibration pattern and wide flat plane

point)을 활용하는 방법이고, 둘째는 규격을 알고 있는 차로표시(lane marking)를 활용하는 방법이다. 복수의 소실점을 활용하는 방법은 지표면 상의 여러 쌍의 평행선이 만드는 복수의 소실점을 활용하여 포즈를 추정한다. 축구장 구획 표시와 같이 서로 다른 방향으로 평행한 직선들로부터 검출한 복수의 소실점을 활용하거나,⁷⁾ 어안렌즈의 특성을 활용하여 주차구획의 H자 모양을 활용하는 방법이 제안되었다.⁸⁾ 이 접근법은 전방 카메라의 경우 어안렌즈를 쓰는 경우가 거의 없고, 일반적인 전방 장면에 복수의 소실점이 동시에 발생하는 경우가 드물다는 한계가 있다. 규격을 알고 있는 차로표시를 활용하는 접근법은 일반적인 주행 상황에서 흔하게 관찰할 수 있는 차로표시의 길이나 주기, 차로 폭 등을 활용한다.^{4,9)} 주로, 주행 중에 온라인 캘리브레이션(online calibration)¹⁰⁾ 또는 능동 캘리브레이션(dynamic calibration)을 위한 방법으로 제안되었다. 이 접근법은 차로표시의 특징을 알고 있거나 측정해야 한다는 한계가 있다.

본 논문은 위 두 가지 방법의 장점을 결합하여, 연구/개발용 카메라 캘리브레이션과 사용 중 진단(diagnosis)을 위한 차로표시 기반 포즈 추정 방법을 제안한다. 즉, 직선 도로의 좌우 차로표시는 평행하다고 가정하고, 차로표시와 카메라 광축 사이 수평 각도가 달라지도록 이동하면서 전방 영상을 촬영하고, 각 영상에서 좌우 차로표시의 교점인 소실점을 검출함으로써 소실선을 검출하고 이를 근거로 카메라 포즈를 추정한다. 제안된 방법은 차량이 이동하는 동안 카메라의 Z 축과 지표면 법선벡터(normal vector) 사이 각도는 불변이라는 사실에 근거한다.

즉, 차량이 어떤 평면 위 서로 다른 위치에서 서로 다른 방향을 향해도, 그 차량에 고정된 카메라로 촬영된 영상의 지표면 소실선(vanishing line)은 변하지 않는다. 기존 복수의 소실점을 활용하는 방법은 단일 영상 내에 복수의 서로 다른 평행선 쌍이 존재하는 경우에만 사용이 가능하지만, 제안 방법은 주변에서 쉽게 발견할 수 있는 차로표시를 여러 번 촬영한 영상을 사용하기 때문에 장소 제약이 적다는 장점이 있다. 또, 규격을 알고 있는 차로표시를 활용하는 방법은 측정하기 어려운 차로 폭, 차로표시의 길이나 주기 등을 사용하지만, 제안 방법은 평행하게 그려진 차로표시를 추가 지식 없이 사용한다는 점에서 편리하다는 장점이 있다.

본 논문은 2장에서 소실선 기반 틸트각 및 롤각 추정 방법을 설명하고, 3장에서 한 쌍의 평행선을 여러 각도에서 촬영하여 소실선을 추정할 수 있음을 보이고, 4장에서는 소실점 기반 팬각 추정 방법을 설명하고, 5장에서 실험결과를 통해 제안 방법이 유용함을 보인다. 끝으로, 6장에서 결론을 제시한다.

2. 소실선 기반 틸트각 및 롤각 추정

2.1 소실선 기반 지표면 법선벡터 추정

본 절에서는 소실점들로 이루어진 소실선을 활용하여 지표면의 법선벡터를 추정할 수 있음을 보인다.

카메라 중심 좌표계로 표현된 3차원 공간상의 점 $P_C(X, Y, Z)$ 는 원근투영에 의해 $p_c(x, y)$ 로 투영되고,

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

그 상은 영상좌표 $p(u, v)$ 에 해당한다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, f 는 meter단위의 초점거리를 나타내고, K 는 내부 매개변수 행렬을 나타낸다. 본 논문에서는 설명의 편의를 위해 두 초점거리 α_u, α_v 가 서로 같은

값이라고 가정하고, α 로 나타낸다. 원근 투영과 제차좌표(homogeneous coordinates)의 성질에 따라 다음 벡터들은 서로 평행하다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \parallel \begin{bmatrix} f \frac{X}{Z} \\ f \frac{Y}{Z} \\ f \end{bmatrix} \parallel \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} \\ \frac{Y}{Z} \\ 1 \end{bmatrix} \parallel \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} \parallel \begin{bmatrix} \frac{x}{f} \\ \frac{y}{f} \\ 1 \end{bmatrix}}_{\text{meter단위}} \parallel \underbrace{\begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ \alpha \end{bmatrix} \parallel \begin{bmatrix} \frac{u - u_0}{\alpha} \\ \frac{v - v_0}{\alpha} \\ 1 \end{bmatrix}}_{\text{pixel단위}} \quad (4)$$

따라서 영상좌표 p 의 제차좌표 p_h 는 K 의 역행렬을 곱해서 구할 수 있다.

$$p_h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \frac{x}{f} \\ f \frac{y}{f} \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{f} \\ \frac{y}{f} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K^{-1} p \quad (5)$$

먼저, 3차원 공간상의 평행한 두 직선이 형성하는 소실점을 구해보자. 3차원 공간상의 점 (X_0, Y_0, Z_0) 를 지나고 벡터 (A, B, C) 에 평행한 직선은 매개변수 t 를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & [X(t) \ Y(t) \ Z(t)]^T \\ &= [A \ B \ C]^T t + [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T \\ &= [At + X_0 \ Bt + Y_0 \ Ct + Z_0]^T \end{aligned} \quad (6)$$

이 직선의 상은 2차원 공간상의 직선이고, 이 직선상의 점 $(x(t), y(t))$ 는 (6)을 (2)에 대입하여 구할 수 있다.

$$x(t) = \frac{X(t)}{Z(t)} = \frac{At + X_0}{Ct + Z_0}, y(t) = \frac{Y(t)}{Z(t)} = \frac{Bt + Y_0}{Ct + Z_0} \quad (7)$$

3차원 공간상의 직선 위 한 점이 카메라로부터 무한히 멀어질 때, 그 상 (x_{vp}, y_{vp}) 는 (8)과 (9)와 같이, 그 직선의 방향 벡터로 결정된다. 즉, 3차원 공간상의 직선의 소실점은 그 방향 벡터에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

$$x_{vp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{At + X_0}{Ct + Z_0} = \frac{A}{C} \quad (8)$$

$$y_{vp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Bt + Y_0}{Ct + Z_0} = \frac{B}{C} \quad (9)$$

다음으로 3차원 공간상의 평면의 소실선을 구해보자. 어떤 3차원 공간상의 평면

$$\alpha X + \beta Y + \gamma Z + \varphi = 0 \quad (10)$$

을 가정하면, 이 평면에 포함된 모든 직선은 평면의 법선 벡터에 수직하다.

$$\begin{aligned} [A \ B \ C][\alpha \ \beta \ \gamma]^T &= 0 \\ A\alpha + B\beta + C\gamma &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

이 성질 (11)을 (9)에 대입하고,

$$y_{vp} = \frac{B}{C} = \frac{1}{C} \left(-\frac{1}{\beta} \right) (A\alpha + C\gamma) = -\frac{\alpha}{\beta} \frac{A}{C} - \frac{\gamma}{\beta} \quad (12)$$

(8)을 (12)에 대입하면 소실선의 방정식 (13)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_{vp} &= -\frac{\alpha}{\beta} x_{vp} - \frac{\gamma}{\beta} \\ \alpha x_{vp} + \beta y_{vp} + \gamma &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

즉, 한 평면에 속한 모든 직선은 반드시 소실선 상의 한 점에서 소실점을 형성하고, 그 소실선은 그 평면의 법선 벡터에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 이는 역으로, 검출된 소실선의 계수로부터 지표면의 법선벡터를 추정할 수 있음을 의미한다.

영상에서 검출된 소실점은 픽셀 단위의 영상좌표 p인데, 소실선 방정식의 (x_{vp}, y_{vp}) 는 meter단위의 카메라 중심 좌표 p_c 이어야 하기 때문에, 검출된 소실점들을 (5)에 의해 변환한 후 소실선의 방정식을 추정한다.

$$\alpha x_{vp} + \beta y_{vp} + c = 0 \quad (14)$$

이때, (13)과 (14)는 3차원 공간상의 한 평면의 소실선이지만, (14)는 제차좌표를 이용해 구했기 때문에 각 계수는 서로 크기만 다른 관계(up to scale)이다. 따라서, 영상들로부터 구한 (14)를 사용하여 3차원 공간상의 평면의 단위 법선벡터 $\hat{\mathbf{n}}$ 을 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right]^T$$

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{k\alpha}{k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \quad \frac{k\beta}{k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \quad \frac{k\gamma}{k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \right]^T \\ &= \left[\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \quad \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \quad \frac{\gamma}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \right]^T \quad (15) \\ &= [\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ \hat{\gamma}] = \hat{\mathbf{n}} \end{aligned}$$

2.2 틸트각 및 롤각 추정

지평면의 단위 법선벡터 $\hat{\mathbf{n}} = [\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ \hat{\gamma}]^T$ 로부터 롤각 ψ 와 틸트각 θ 을 추정한다. 즉, $[0 \ 1 \ 0]^T$ 을 X축에 대해서 θ 만큼 회전시키고 Z축에 대해서 ψ 만큼 회전시켜서 $[\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ \hat{\gamma}]^T$ 이 되었다고 가정한다.

롤각 ψ 의 크기는 $\hat{\mathbf{n}}$ 의 XY평면으로의 사영 $[\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ 0]^T$ 과 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 사이 각도이고, 부호는 두 벡터의 외적 $[0 \ 1 \ 0]^T \times [\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ 0]^T$ 의 Z좌표의 부호와 같다. 롤각은 Z축 회전이며, X축에서 Y축으로 감는 방향이 양수이다. 또, 롤각이 $-\pi/2$ 와 $\pi/2$ 사이 범위 밖에 있는 경우, 원점 대칭인 값으로 변환하여 그 범위 내에 있도록 강제한다.

틸트각 θ 의 크기는 $[\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ 0]^T$ 과 $[\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ \hat{\gamma}]^T$ 사이 각도이고, 부호는 두 벡터의 외적 $[\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ 0]^T \times [\hat{\alpha} \ \hat{\beta} \ \hat{\gamma}]^T$ 의 X좌표의 부호와 같다. 틸트각은 X축 회전이며, Y축에서 Z축으로 감는 방향이 양수이다. 또, 틸트각이 $-\pi/2$ 와 $\pi/2$ 사이 범위 밖에 있는 경우, 원점 대칭인 값으로 변환하여 그 범위 내에 있도록 강제한다.

3. 차로표시 검출 기반 소실선 추정

앞 장에서 한 평면상에 존재하는 서로 다른 평행선 쌍들이 형성하는 소실선을 활용하여 그 평면의 법선벡터를 추정할 수 있음을 보였다. 하지만, 캘리브레이션 패턴을 사용하지 않는다면, 서로 다른 평행선 쌍들이 존재하는 장면을 찍기는 쉽지 않다. 이 장에서는 차량이 완전히 정차하여 포즈의 동적 변화를 무시할 수 있다면 자동차에 장착된 카메라로

촬영한 영상의 지표면 소실선이 변화하지 않음을 보인다. 이것은 한 장의 영상에 동시에 서로 다른 평행선 쌍들을 촬영할 필요 없이, 차로표시와 같이 평행선 한 쌍을 여러 각도에서 촬영한 영상들로 지표면의 소실선 추정이 가능함을 의미한다.

어떤 3차원 공간상의 점 (X, Y, Z) 를 Y 축을 중심으로 회전시켜도 Y 축과 이루는 각도는 변하지 않는다.

이는 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 과 Y 축 회전된 점의 내적이 회전각도 θ_y 와 무관함을 통해 알 수 있다.

$$[0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Y \quad (16)$$

XYZ 축으로 회전된 좌표계의 표준 단위벡터 (standard unit vector)도 3차원 공간상의 한 점이므로, 이를 Y 축으로 회전시켜도 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 과 이루는 각도는 불변임을 알 수 있다. 이는 카메라 좌표계 축들과 지표면의 법선벡터 사이 각도가 Y 축 회전운동과 무관함을 의미한다.

한발 더 나가, Y 축 회전과 Y 축 변위 T_y 가 0인 병진 운동도 카메라 좌표계 축들과 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 사이 각도를 바꾸지는 않는다. 이는 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 과 변환된 3차원 점의 내적이 Y 축 회전각, X 축 변위 T_x , Z 축 변위 T_z 와 무관함을 통해서 확인할 수 있다.

$$[0 \ 1 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & T_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = [1 \ 1] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = Y + 1 \quad (17)$$

지표면 상을 움직이는 자동차에 장착된 카메라는 Y 축 회전과 X, Z 축 병진운동을 하는 것으로 생각할 수 있기 때문에, 카메라 좌표계 축과 지표면 법선벡터 사이 각도는 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이때, 카메라 좌표계 축과 지표면 법선벡터 사이 각

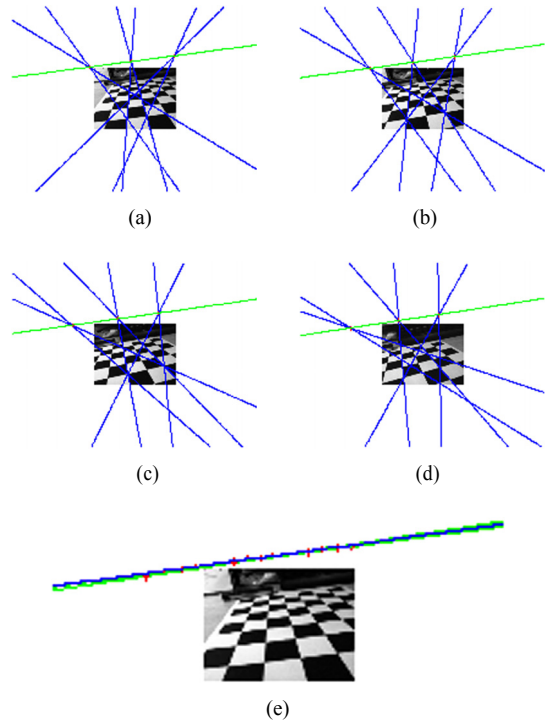


Fig. 2 If images are captured with a camera under planar motion, vanishing lines detected in the images are identical

도는 틸트각과 롤각을 결정하기 때문에, 틸트각과 롤각도 변하지 않는다. Fig. 2(a) ~ (d)는 지그에 고정된 카메라를 캘리브레이션 패턴 위에서 움직이면서 촬영한 연속영상을 보여준다. 각 영상에서 세 쌍의 평행선을 검출하여 소실점과 소실선을 검출하였다. Fig. 2(e)는 (a)~(d)의 소실점과 소실선을 (a) 영상 위에 겹쳐서 그린 결과이다. 카메라가 평면 위에서 방향을 바꾸고 이동하면서 촬영했음에도 불구하고, 지그에 의해 카메라와 지표면 사이 포즈가 유지되었기 때문에 소실선이 일치함을 확인할 수 있다.

4. 소실점 기반 팬각 추정

본 장에서는 차량이 차로방향으로 정렬된 상태에서 촬영된 영상의 소실점을 사용하여 팬각을 추정하는 방법을 설명한다.

앞서 설명한 방법에 따라 추정된 틸트각과 롤각을 사용하여, 카메라가 정면을 바라볼 때의 영상과 지표면을 향할 때의 영상(조감도: bird's eye view)을

생성할 수 있다. 카메라의 포즈가 정면을 향하도록 하는 회전 $\mathbf{R}_{forward} = \mathbf{R}_{X(-\theta)} \mathbf{R}_{Z(-\psi)}$ 를 모든 픽셀에 적용하면, 카메라가 정면을 바라볼 때 영상을 생성할 수 있다. 이때, $\mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y, \mathbf{R}_Z$ 는 각각 X 축, Y 축, Z 축에 대한 회전변환 행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{X}_{forward} = \mathbf{K} \mathbf{R}_{forward} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X} \quad (18)$$

이때, \mathbf{X} 와 $\mathbf{X}_{forward}$ 는 원영상과 정면영상의 픽셀 단위 제차좌표를 나타낸다. 마찬가지로, 카메라의 포즈가 지표면을 향하도록 하는 회전

$\mathbf{R}_b = \mathbf{R}_{X(90^\circ)} \mathbf{R}_{forward} = \mathbf{R}_{X(90^\circ)} \mathbf{R}_{X(-\theta)} \mathbf{R}_{Z(-\psi)}$ 를 모든 픽셀에 적용하면, 조감도를 생성할 수 있다. 이때, $\mathbf{R}_{X(\theta)}$ 는 X 축을 중심으로 θ 만큼 회전하는 변환을 나타내는 행렬이다. 여기서 주의할 점은 카메라가 회전하는 것은 좌표계 회전이기 때문에, 좌표 회전으로는 역방향 회전에 해당한다는 점이다. 즉, 좌표의 회전이기 때문에, 카메라를 아래로 향하는 회전에 해당하는 변환이 $\mathbf{R}_{X(-90^\circ)}$ 이 아니고, $\mathbf{R}_{X(90^\circ)}$ 이다.

$$\mathbf{X}_b = \mathbf{K} \mathbf{R}_b \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X} \quad (19)$$

이때, \mathbf{X}_b 는 조감도의 픽셀 단위 제차좌표를 나타낸다.

일반적으로, 직진 시 주행차로의 소실점을 정면으로 간주하기 때문에, 소실점이 Z 축 상에 오도록 만드는 Y 축 회전각을 팬각 ϕ 로 추정한다. 틸트각과 롤각을 보정한 후의 소실점 $\mathbf{X}_{fvp} = \mathbf{R}_{forward} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{X}_{vp}$ 의 XZ 평면으로의 투영을 $\mathbf{X}_{fvp, xz} = [\mathbf{X}_{fvp}(1) \ 0 \ \mathbf{X}_{fvp}(3)]^T$

라 하자. 팬각 ϕ 의 크기는 $[0 \ 0 \ 1]^T$ 과 $\mathbf{X}_{fvp, xz}$ 사이 각도이고, 부호는 $\mathbf{X}_{fvp, xz}$ 의 X 좌표의 부호와 같다. 팬각은 Y 축 회전이며, Z 축에서 X 축으로 감는 방향이 양수이다. 차량이 차로표시 방향으로 정렬된 상태에서, 팬각까지 보정한 회전변환

$\mathbf{R}_b = \mathbf{R}_{X(90^\circ)} \mathbf{R}_{Y(-\phi)} \mathbf{R}_{forward} = \mathbf{R}_{X(90^\circ)} \mathbf{R}_{Y(-\phi)} \mathbf{R}_{X(-\theta)} \mathbf{R}_{Z(-\psi)}$ 을 적용하여 조감도를 생성하면, 좌우 차로표시가 수직으로 나타난다.

5. 실험결과

자동차 전방에 카메라를 설치하고 차로표시에 대



Fig. 3 Test images are captured while changing the horizontal angle with respect to lane markings. In each image, left and right lane marking is detected, and vanishing point is detected by finding their cross point

한 수평각도를 변경하면서 촬영한 영상을 사용하여 제안된 방법을 검증하였다. 틸트각 및 롤각이 큰 경우와 작은 경우 각각에 대하여 실험을 수행하였다. 도입부에서도 설명한 바와 같이, 자동차에 장착된 카메라의 포즈를 정밀하게 측정하는 것은 현실적으로 곤란하고, 캘리브레이션 패턴을 사용한 방법의 결과도 정밀도가 떨어지기 때문에, 팬각이 보상된 조감도 상에서 좌우 차로표시가 수직으로 나타나는지 여부를 확인함으로써 제안방법이 유용함을 확인하였다.

먼저, 틸트각과 롤각이 비교적 크게 카메라를 설치하고 Fig. 3과 같이 차로표시에 대한 수평각도를 달리하면서 총 102장의 영상을 획득했다. 영상의 해상도는 640×480 이고, 수평화각이 약 60° 인 저왜곡 렌즈를 사용하였다. 각 영상에서 좌우 차로표시는 일반적으로 많이 사용되는 템플리 정합(template matching) 방법¹¹⁾을 사용하여 반자동으로 검출하였다. 좌우 차로표시 연장선의 교점을 검출하여, 각 영상의 소실점을 검출하였다. Fig. 4는 이렇게 검출된 소실점들을 한 영상에 함께 그린 결과를 보여준다. 차량이 완전히 정지하지 않은 상태에서 촬영하여 소실점들에 약간의 잡음이 포함되었지만, 전체적으로 소실점들이 직선을 형성함을 확인할 수 있다. 소실점들을 지나는 직선을 최소 자승법으로 추정하여 소실선을 검출하였다.

제안된 방법에 따라 틸트각과 롤각을 추정된 결과, 각각 9.8259° , -3.9852° 의 값을 얻었다. Fig. 5(a)는 이 결과를 사용하여 조감도를 생성한 결과를 보여준다. 좌우 차로표시가 일정한 간격으로 펼쳐진 것



Fig. 4 Vanishing line is detected by fitting detected vanishing points (blue dot) into a line (red line)



Fig. 6 Detected vanishing points and line of the second test set with small tilt and roll angle

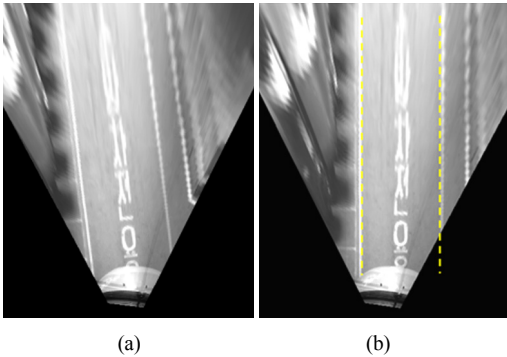


Fig. 5 Bird's eye view image using the estimation result (a) When tilt and roll angle are compensated (b) When tilt, roll, and pan angle are compensated. Up right lane markings show that the estimated pose is correct and accurate

을 확인할 수 있다. 원거리에서 큰 잡음으로 화질이 급격히 저하되는 것은 단순한 모자이크 제거 방법 (simple demosaicking)을 사용하여 베이어 패턴(Bayer patter)의 악영향이 완전히 제거되지 않았기 때문이다.¹²⁾ 차량을 차로표시 방향으로 정렬했다고 가정하고, 제안된 방법에 따라 팬각을 추정한 결과 -6.8961 도의 값을 얻었다. Fig. 5(b)는 이 결과를 사용하여 팬각이 보상된 조감도를 생성한 결과를 보여준다. 노란색 점선으로 표시된 좌우 차로표시가 원거리까지 거의 수직인 것을 확인할 수 있는데, 이것은 제안된 방법으로 추정된 틸트각, 롤각, 팬각이 모두 정확함을 의미한다.

틸트각과 롤각이 비교적 작은 경우에도 제안된 방법이 잘 작동하는지를 검증하기 위하여, 수평계를 사용하여 카메라가 지표면과 최대한 수평이 되도록 설치하고 앞서와 같은 방법으로 총 28장의 영

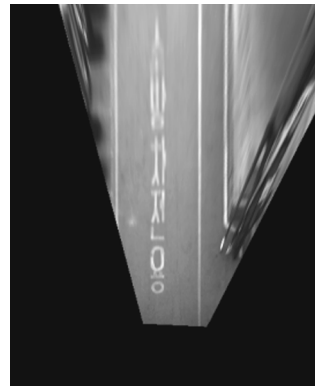


Fig. 7 Bird's eye view image of the second test set when tilt, roll, and pan angle are compensated

상을 획득하였다. 이전 실험과 다른 카메라를 사용하였으며, 렌즈도 수평화각이 약 45도인 저왜곡 렌즈를 사용했다. Fig. 6은 소실점과 소실선 검출 결과를 보여준다. 앞서와 같은 방법으로 틸트각, 롤각, 팬각을 추정한 결과 각각 -0.67732 도, 0.9567 도, -6.2987 도의 값을 얻었다. Fig. 7은 이 결과를 사용하여 팬각이 보상된 조감도를 생성한 결과를 보여준다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 소실점에 상당한 잡음이 존재하고 비교적 작은 수의 영상만을 사용하였음에도 불구하고, 좌우 차로가 수직에 가깝게 정확한 포즈를 추정했음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 차량이 이동하여도 장착된 카메라로 촬영된 영상의 지표면 소실선이 변하지 않는 점과 그 소실선으로부터 지표면의 법선벡터를 추정할 수

있는 점을 사용하여, 직선 도로 상에서 평행하게 그려진 차로표시에 대한 수평각도를 변경하면서 촬영한 복수 영상들에서 검출된 차로표시의 소실점들을 활용하여 카메라의 포즈를 추정하는 방법을 제안하였다. 실험을 통해, 제안된 방법이 틸트각과 롤각이 큰 경우와 작은 경우 모두에서 정확한 결과를 추정할 수 있음을 팬각이 보상된 조감도를 활용하여 검증하였다.

추가연구로 좌우 차로표시가 평행하지 않을 때 영향 분석 및 이를 이용하여 제안 방법을 사용할 수 있는지 여부를 판단하는 방법 개발이 필요하다. 또, 다음 단계로 제안 방법을 온라인 캘리브레이션에 활용할 수 있도록 확장하는 방법을 개발할 계획이다. 이를 위하여, 주행 중 카메라 포즈의 잡음을 차량 동역학에 기반하여 제거하는 방법과 일상적인 주행 장면에서 소실선을 검출하는 방법의 개발이 필요할 것으로 예상된다. 특히, 차량이 주행 중에는 차로표시와의 수평각도를 크게 변경할 수 없기 때문에 연속적으로 방향이 바뀌는 곡선로 상의 차로표시의 점선을 활용하는 방법을 개발할 계획이다.

후 기

본 연구는 지능형자동차상용화연구기반구축사업(과제명 “GPS-DR, 영상 및 도로 정보를 융합한 횡방향 정밀도 20 cm 이내의 저가형 측위 시스템 개발”, 과제번호: 10045880)의 지원을 받아 수행하였다. 제안 방법의 MATLAB 프로그램과 실험 결과는 인터넷을 통해 공개되었다.¹³⁾

References

- 1) R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer-Verlag London Limited 2011.
- 2) Caltech Calibration Toolbox, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc, 2015.
- 3) M. Bertozz, A. Broggi and A. Fascioli, “Stereo Inverse Perspective Mapping: Theory and Applications,” Image and Vision Computing, Vol.16, No.8, pp.585-590, 1998.
- 4) M. B. de Paula, C. R. Jung and L. G. da Silveira Jr., “Automatic On-the-fly Extrinsic Camera Calibration of Onboard Vehicular Cameras,” Expert Systems with Applications, Vol.41, Issue 4, Part 2, pp.1997-2007, 2014.
- 5) G. Stein, O. Shachar, E. Belman, G. Hayon and I. Gat, Bundling of Driver Assistance Systems, US Patent No. 8254635, 2012.
- 6) L. Mazzei, P. Medici and M. Panciroli, “A Lasers and Cameras Calibration Procedure for VIAC Multi-sensorized Vehicles,” Intelligent Vehicles Symposium, pp.548-553, 2012.
- 7) V. Babaee-Kashany and H. R. Pourreza, “Camera Pose Estimation in Soccer Scenes Based on Vanishing Points,” IEEE International Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games, pp.1-6, 2010.
- 8) S. Li and Y. Hai, “Estimating Camera Pose from H-Pattern of Parking Lot,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, pp.3954-3959, 2010.
- 9) A. Guiducci, “Camera Calibration for Road Applications,” Computer Vision and Image Understanding, Vol.79, No.2, pp.250-266, 2000.
- 10) S. Nedeveschi, C. Vancea, T. Marita and T. Graf, “Online Extrinsic Parameters Calibration for Stereovision Systems Used in Far-range Detection Vehicle Applications,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.8, No.4, pp.651-660, 2007.
- 11) D. Kim and H. Jung, “Road Surface Marking Detection for Sensor Fusion-based Positioning System,” Transactions of KSAE, Vol.22, No.7, pp.107-116, 2014.
- 12) J. K. Suhr, H. G. Jung, G. Li and J. Kim, “Mixture of Gaussians-based Background Subtraction for Bayer-pattern Image Sequences,” IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.21, No.3, pp.365-370, 2011.
- 13) H. G. Jung, Lane Detection (LD)-based Pose Calibration, http://web.yonsei.ac.kr/hgjung/LD_based_pose_calibration.htm, 2015.