

V.F. 모델링을 이용한 주행차량의 진동에 대한 도로영상의 계측오차 보정 알고리즘

A Measurement Error Correction Algorithm of Road Image for Traveling Vehicle's Fluctuation Using V.F. Modeling

김 태 호*, 서 경 호
(Tae Hyo Kim and Kyung Ho Seo)

Abstract : In this paper, the image modelling of road's lane markings is established using view frustum(VF) model. From this model, a measurement system of lane markings and obstacles is proposed. The system also involve the real time processing of the 3D position coordinate and the distance data from the camera to the points on the 3D world coordinate by virtue of the camera calibration. In order to reduce their measurement error, an useful algorithm for which analyze the geometric variations due to traveling vehicle's fluctuation using VF model is proposed. In experiments, without correction, for instance, the 0.4° of pitching rotation gives the error of 0.4~0.6m at the distance of 10m, but the more far distance cause exponentially the more error. We confirmed that this algorithm can be reduced less than 0.1m of error at the same condition.

Keywords : 3D position coordinate, camera calibration, VF model, yawing error, pitching error, error correction algorithm

I. 서론

80년대 중반부터 ITS, PATH, ASV, PROMETHEUS 등 국가적 또는 지역적 프로젝트의 추진을 통하여 이러한 ISV 분야의 연구가 활발히 진행되고 있으며 실용화에 박차를 가하고 있다[1,2]. 주행하는 차량의 충돌경보 시스템(Collision Warning System CWS)은 ISV 기술의 기초적인 중요한 분야로서 자차량의 진행방향 전방에 차량의 유무를 식별하고 충돌 또는 추돌 가능성을 판단하여 그 가능성이 인정될 때 운전자에게 효과적으로 경보를 보냄으로써 운전자에게 경각심을 불어넣어 사고를 미연에 방지하려는 기술이다[3-8]. Kluge와 Thorpe[9]는 YARF시스템을 위해 도로면이 평면이라 가정하여 차선을 인식하였고 Dick-manns[10]는 크로소이드 곡선(clothoid curve)으로 도로를 표현하여 곡선 도로를 표현하였다. 그리고 Kaske A.와 Wolf D.[11,12]는 영상에서의 도로 에지를 쌍곡선으로 표현하였다.

이러한 도로에 대한 여러 가지 모델들은 차량으로부터 가까운 거리에 있는 도로만이 잘 적용이 될 수 있으며 멀리 떨어진 도로에는 이러한 단순한 기하적인 모델이 적용되지 못한다. 일반적인 도로상황을 모델화하기 위해서는 더욱 복잡한 수식표현이 사용되어 지는데, 예를 들면 DeMenthon[13]은 도로를 일정한 길이만큼 수평으로 구분하여 도로의 3D 특성을 복원하였고, 이후 Kanatani[14]는 미분방정식으로 기하적인 조건들을 나타내는 유사한 방법을 사용하였다. 이러한 도로 모델들은 비구조적인 도로에 잘 적용이 되어 지나 복잡성으로 인해서 계산시간이 오래 걸리

는 단점이 있다. 차량 충돌회피를 위해서 차간 거리계산은 중요하지만 도로의 굴곡으로 인한 차량의 흔들림으로 말미암아 많은 오차를 감수해야 하므로 신뢰할 만한 정보를 얻기가 쉽지 않다. LIAO Chuanjin과 QIN Xiaohu[7]등은 실제 도로를 3차원적인 모델로 재구성하여 거리계측을 하고자 하였으나 모델 적용의 거리 제한과 도로 굴곡으로 인해 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 그리고 Erez Dagan과 Ofer Mano[8]는 도로를 모델로 복원하는 과정을 거치지 않고 영상에 나타나는 차량의 크기와 위치만으로 충돌 가능성을 예측하고자 하였으나 두 차량의 상대 가속도를 고려한 차간 거리 계산이 시간에 대한 미분 방정식으로 주어짐으로 복잡한 수치계산을 거쳐야 하는 단점이 있다. 기존의 차선 검출 및 차량 인식 알고리즘들은 차량과 카메라, 도로 상호간의 기하관계를 단순한 모델로 가정하여 설정하였다. 즉 도로면은 평면으로 가정하고 도로평면과 차체 사이의 변화 성분은 없는 것으로 하였다. 이로 인해 실제 도로면에서 생길 수 있는 요잉과 피칭에 의한 오차 보정이 무시되어 정확한 계측 및 상황판단을 할 수 없었다.

따라서 본 논문에서는 주행하는 차량의 요잉 및 피칭에 의한 계측의 오차성분을 보정하기 위하여 피라미트 구조를 가지는 V.F. 모델을 이용하여 오차가 발생하는 각 경우를 분석하고 그 오차를 보정하여 주행하는 차량에서 전방의 도로상황 인식의 정확성을 개선하고자 한다.

II. 카메라 Calibration 알고리즘

이상적인 핀홀 카메라 모델에서 영상평면좌표계와 카메라좌표계의 관계는 님은 삼각형의 성질을 이용하여 (1)과 같이 표현할 수 있다[5].

$$s \cdot \vec{m}_s = P \cdot \vec{m}_c \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 13., 채택확정 : 2006. 6. 8.

김태호 : 경남대학교 전자공학과(hyo@kyungnam.ac.kr)

서경호 : 한국폴리텍 항공대학 항공정보통신(shkh@kopo.ac.kr)

※ 본 논문은 2005년도 경남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

여기서, s : 영상의 스케일

\widetilde{m}_s : 영상평면 좌표에 대한 확장벡터

\widetilde{m}_c : 카메라좌표에 대한 확장벡터

$$P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ 사형행렬}$$

영상평면과 실제 카메라의 CCD소자들이 만드는 디지털 영상평면의 대응관계는 일치하지 않으므로 이에 대한 관계는 카메라의 내부변수로 나타낼 수 있으며, 그림 1과 같이 카메라 내부변수를 고려할 때의 디지털영상좌표는 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\widetilde{m} = H \cdot \widetilde{m}_s \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & -k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

\widetilde{m} : 디지털영상평면좌표

k_u = 촬상소자 CCD 단위셀의 수평축 길이

k_v = 촬상소자 CCD 단위셀의 수직축 길이

u_0, v_0 는 각각 디지털영상평면의 중심좌표

θ : CCD 단위셀의 수직축과 수평축이 이루는 각도

한편, 디지털 영상평면좌표계와 카메라좌표계 사이의 관계는 (1)과 (2)를 이용하여 다음 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s \cdot \widetilde{m} = H \cdot P \cdot \widetilde{m}_c \quad (3)$$

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & -k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

한편, 카메라좌표계와 실세계좌표계 간의 관계식을 그림 2를 이용하여 유도해 보면 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$D \widetilde{m}_w = \widetilde{m}_c$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$D = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\widetilde{m}_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \widetilde{m}_c = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

$\widetilde{m}_c = R \widetilde{m}_w + t$, R: 회전성분, t : 병진(이동) 성분
D는 카메라의 외부변수를 의미한다.

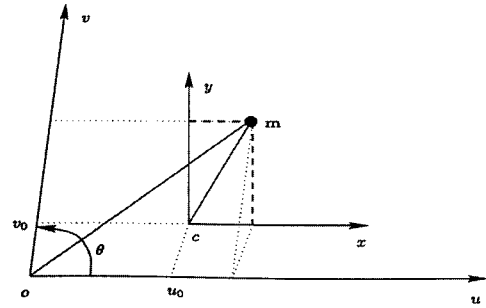


그림 1. 카메라 내부 변수 표현.

Fig. 1. Representation of internal parameters for camera.

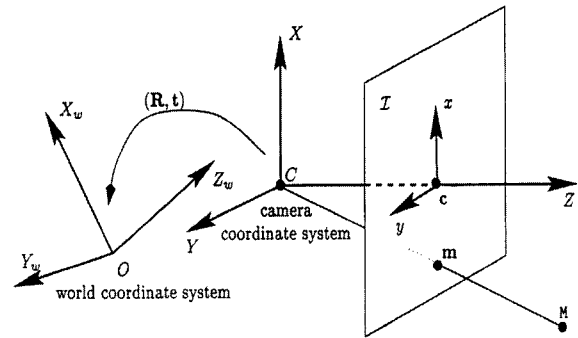


그림 2. 각 좌표계 표현.

Fig. 2. Representation of each coordinates.

지금까지의 관계로부터 디지털영상평면좌표계와 실세계좌표계간의 관계식을 (5)로 표현할 수 있다.

$$s \cdot \widetilde{m} = H \cdot P \cdot D \cdot \widetilde{m}_w$$

즉,

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & -k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

싱글 카메라를 사용하여 도로평면 위의 임의의 점에 대한 실세계좌표를 구하는데 (5)가 적용되어지며, 이러한 경우 도로영상은 평면인 것으로 가정한다.

III. V.F.를 이용한 도로구조 모델링

실세계좌표계와 카메라좌표계 사이의 기하구조 해석을 위하여 V.F. 모형의 기하구조를 가지는 모델로 나타낼 수 있다. V.F.은 하나의 3차원 장면 안에서 보이는 모든 것들을 표현하는 공간적 입체구조이다[15,16]. V.F.는 피라밋 형태이며 피라밋의 꼭대기가 카메라의 위치에 해당한다. 이러한 형태는 카메라로 직사각형 창문을 내다볼 때 생기는 입체를 그대로 반영하는 것이다. V.F.는 6개의 평면들로 정의되며 그 중 네 개는 화면의 네 가장자리 변들을 결정한다. 즉 이 네 평면들은 V.F.의 상, 하, 좌, 우 면들을 결정하고

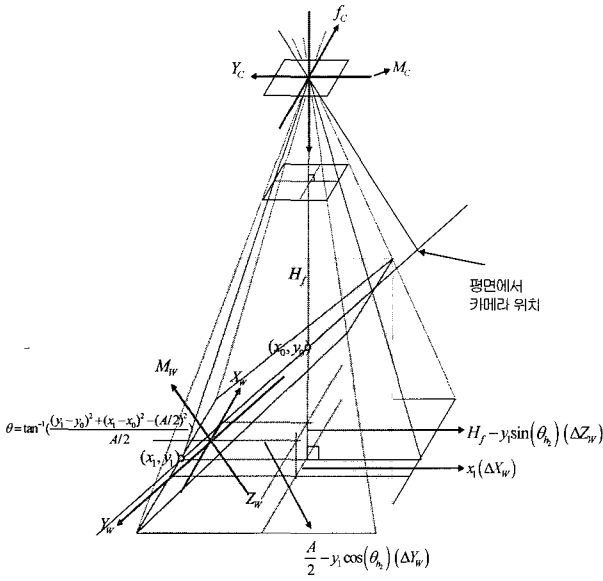


그림 3. V.F. 모델.
Fig. 3. V.F. model.

나머지 두 평면들은 절두체의 가까운 평면과 먼 평면을 결정한다. 그림 3에서 사각뿔 중간의 평면은 CCD셀이 영상평면을 나타내며, 밑면은 도로평면을 그리고 꼭지점의 평면은 카메라좌표를 나타낸다.

카메라 좌표계(M_c)와 실세계 좌표계(M_w) 사이의 대응 관계는 그림 3과 같다[17]. H_f 는 카메라 중심에서 V.F. 면까지의 수직거리이며, ΔZ_w , ΔX_w , ΔY_w 는 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 좌표변환을 위한 이동 성분, θ 는 회전성분을 나타내고, 다음 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X_w &= x_1 \\ \Delta Z_w &= H_f - y_1 \sin(\theta_h) \end{aligned} \quad (6)$$

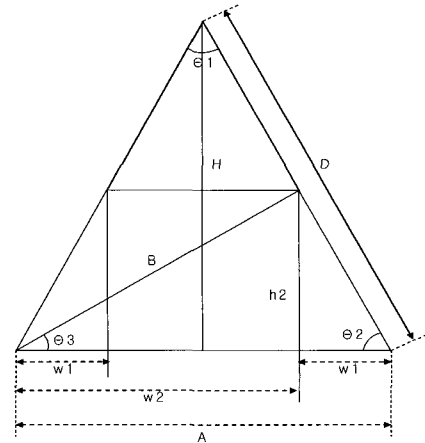
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2 - (A/2)^2}{A/2} \right)$$

그리고 회전과 병진에 대한 행렬은 (7)과 같으며, T_x , T_y , T_z 는 (7)과 같이 X축, Y축, Z축 방향으로의 이동성분을 나타내고, θ 는 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 X축 회전량을 나타낸다.

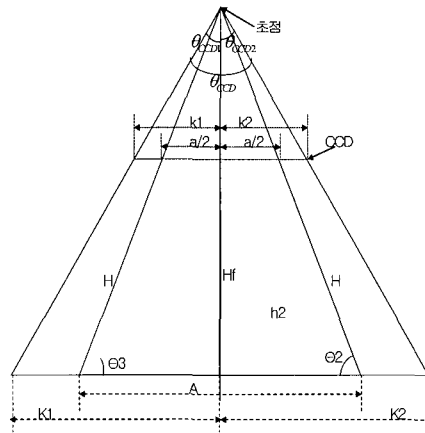
$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & T_y \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \theta &= \Delta X_\theta \\ T_x &= -\Delta X_w \\ T_y &= -\Delta Y_w \\ T_z &= -\Delta Z_w \end{aligned} \quad (7)$$

이제 실험 모델에서의 실세계 좌표계 임의의 한 점을 카메라 좌표계에서의 한 점으로 변화시킬 수 있다. 또한 V.F. 모델을 기하적으로 해석하면 카메라 CCD셀의 화각을 정확하게 구할 수 있으며, 그림 4에 그 기하적 구조를 나타내었다. 카메라와 도로 평면이 이루는 각도 θ_3 은 다음 (8)과 같다.

$$\theta_3 = \tan^{-1}(h_2/w_2) \quad (8)$$



(a) Side view



(b) View of cutting plane

그림 4. V.F.기하구조.

Fig. 4. Geometric structure of V.F. model.

그리고 $a/2$, k_1 , k_2 가 단위 픽셀 개수를 나타낼 때, CCD 셀의 화각 θ_{CCD} 는 (9)에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} \theta_{CCD1} &= \tan^{-1} \left(\frac{K_1}{H_f} \right) \\ \theta_{CCD2} &= \tan^{-1} \left(\frac{K_2}{H_f} \right) \\ \theta_{CCD} &= \theta_{CCD1} + \theta_{CCD2} \end{aligned} \quad (9)$$

도로평면의 세 점을 알면 (10)을 이용하여 도로평면의 방정식을 구할 수 있다[18,19].

$$\begin{aligned} N_a &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \\ N_b &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \\ N_c &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \\ N &= \sqrt{N_a^2 + N_b^2 + N_c^2} \end{aligned}$$

여기서, $a = \frac{N_a}{N}$, $b = \frac{N_b}{N}$, $c = \frac{N_c}{N}$

$$d = -(ax_1 + by_1 + cz_1) \quad (10)$$

평면의 방정식에서 a, b, c는 평면의 법선을 나타내므로, 카메라의 중심을 지나고 평면의 법선 벡터와 평행한 직선의 방정식은 (11)과 같다.

$$\frac{x-0}{x_m} = \frac{y-0}{y_m} = \frac{z-0}{z_m} = t \quad (x_m, y_m, z_m \text{ 은 평면의 법선벡터})$$

$$x = x_m t, \quad y = y_m t, \quad z = z_m t \quad (11)$$

따라서 도로평면에서의 카메라의 위치 점은 평면과 직선이 만나는 점이 되므로 (10)과 (11)을 연립하여 풀면 (12)와 같이 카메라의 위치를 구할 수 있다.

$$(ax_m + by_m + cz_m)t + d = 0$$

$$t = \frac{-d}{ax_m + by_m + cz_m}$$

$$x = x_m \times \left(\frac{-d}{ax_m + by_m + cz_m} \right) \quad (12)$$

$$y = y_m \times \left(\frac{-d}{ax_m + by_m + cz_m} \right)$$

$$z = z_m \times \left(\frac{-d}{ax_m + by_m + cz_m} \right)$$

한편, 카메라의 설치 높이는 카메라의 중심에서 도로평면까지의 수직거리를 구하면 되므로 (13)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$l = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (13)$$

IV. 차체진동에 의한 오차보정 알고리즘

1. Yawing 오차

요잉오차는 그림 5와 같이 차량의 주행 방향이 바뀌었을 경우 소실점의 좌표가 변화한다. 여기서 차량 주행방향의 변화는 즉시 카메라 시선방향 변화로 나타나며, 이때 소실점이 맺히는 CCD 셀의 카메라 시선방향이 차량의 주행방향과 차선이 이루는 각도와 같다.

그림 6은 소실점의 좌표와 주행방향과 차선이 이루는 각도 및 소실점 좌표 사이의 관계를 보여준다.

여기서 영상의 x방향 중심좌표 u0 성분과 소실점의 x좌표 u가 이루는 화각의 차이를 구하면, 교정시의 차선방향에 대한 정보와 더불어 차선과 차량 주행방향과의 관계를 알 수 있게 된다.

요잉오차의 화각을 계산하기 위하여 그림 4의 (b)에서 Hf는 V.F.의 밑면까지의 높이, A는 밑면에 대한 한 변의 길이이고 각 변수의 값은 이미 알고 있는 값이다. 그러므로 CCD셀의 화각을 계산하기 위하여 아래와 같은 (9)를 이용할 수 있다. (9)에서 K1은 K1 = k1/a 이므로 단위 픽셀 개수인 k1이 1~320범위에서 변화되어질 때 각 화소의 Yc 축과의 yawing 각도 계산은 다음 (14)와 같다. 결국 교정 시에 Hf와 A값을 알면 소실점의 v 좌표를 이용하여 간단히 차선과 주행방향의 각도를 (14)의해서 구할 수 있다.

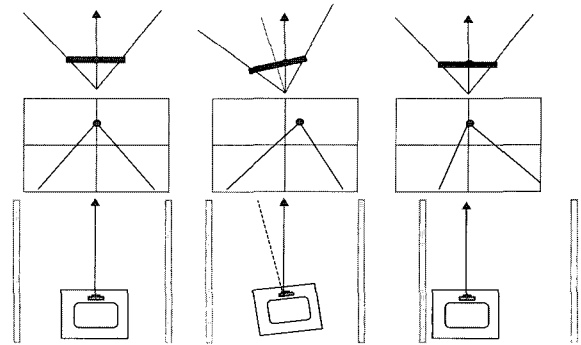


그림 5. 요잉회전에 의한 소실점 좌표변화.

Fig. 5. Coordinate variation of vanishing point caused by yawing rotation.

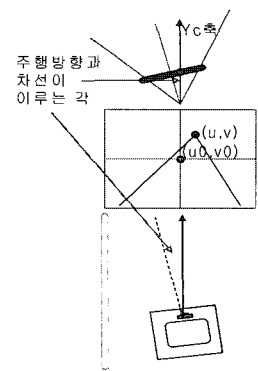


그림 6. 소실점 좌표와 차량의 요잉회전 관계.

Fig. 6. A relation between vehicle's yawing rotation and vanishing point.

- a : 영상중심에서의 좌표
- A : a에 대한 V.F.의 밑면에 대한 변의 크기
- Hf : V.F.의 높이

$$\theta_{CCD} = \tan^{-1} \left(\frac{K_1}{H_f} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{k_1}{a} \times A}{H_f} \right) \quad (14)$$

2. Pitching 오차

지금까지의 많은 논문들은 차량과 도로평면 사이의 기하 관계를 단순한 모델에 한정하여 논의하였다[20,21]. 따라서 여러 가지 실제적인 기하적 오차가 무시됨으로 인해 정확한 계측값을 얻기가 곤란하였다. 이에 따라 본 논문에서는 주행 중 차량에 영향을 미치는 여러 가지 실제적인 기하적 오차를 고려하여 보정함으로써 실시간 계측의 정확성을 개선한다. 특히 차량의 피칭변화에 따른 카메라 계측의 오차를 보정하고자 하였고 이에 대한 오차를 확인하기 위하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 시뮬레이션은 기준 측정각도에 대해 카메라가 0.5도의 피칭 기울기 변화가 있을 때 측정각도에 대한 거리의 오차를 비교해 볼 수 있도록 하고 있다. 그래프의 X축은 각도를 Y축은 거리를 나타내며 가운데 곡선이 카메라가 장애물을 바라보는 시선방향에 대한 거리를 정확히 측정하였을 때의 그래프이고 위와 아래 그

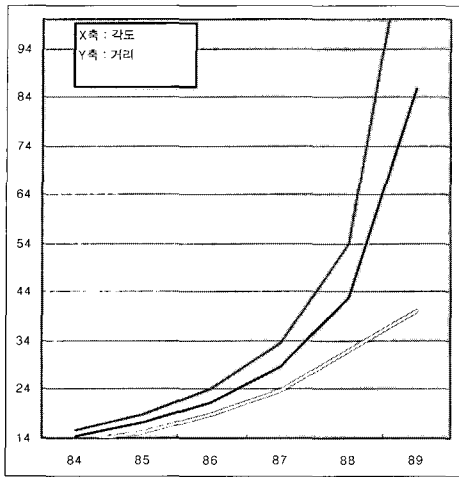


그림 7. 피칭 변화로 인한 거리계측 오차(X축: 각도, Y축: 거리).
 Fig. 7. Distance measurement error due to pitching variation(X axis : degree, Y axis : distance).

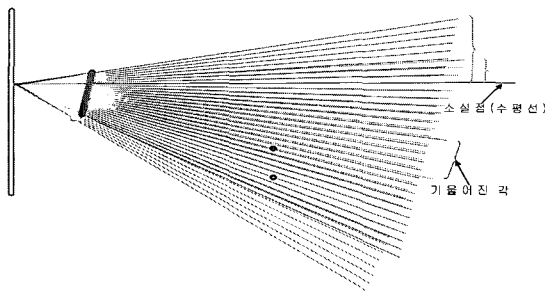


그림 8. 피칭각도 변화에 의한 소실점 위치변화.
 Fig. 8. Vanishing point position's variation by pitching degree's variation.

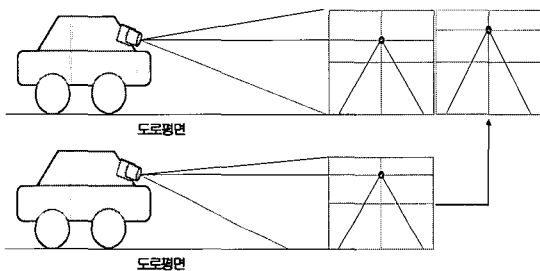


그림 9. 피칭 변화에 의한 소실점 위치 변화의 예.
 Fig. 9. An example for vanishing point position's variation by pitching variation.

래프가 각각 ±0.5도의 변화가 있을 때 오차를 포함하고 있는 그래프이다. 차량 추돌을 피하기 위한 거리확보의 관심 거리가 5m - 100m정도인데 측정값이 5m - 15m 정도에서는 시스템의 유용성에 무리가 가지 않을 정도이지만, 주 관심 영역인 15m - 100m 정도의 측정범위에서는 43m 측정거리에서 11m 정도의 측정오차를 발생하였으며 86m 측정거리에서 46m의 측정오차가 발생하여 시스템의 유용성에 신뢰성이 없게 된다. 그림 7의 그래프에서 위의 2개의 곡선은 실제거

리와 계측한 거리이고, 아래의 흰색 곡선은 차분을 나타낸다. 실제 차량에 탑재한 무게의 변화에 따른 피칭각도가 1도 이상의 변화가 가능한 것을 고려하면 피칭각도 보정이 얼마나 중요한가를 알 수 있으며, 이에 본 논문에서는 카메라의 피칭변화에 대한 오차성분의 보정 알고리즘을 제안한다.

그림 8과 그림 9는 각각 카메라의 피칭에 의한 각도변화로 발생하는 소실점의 좌표변화를 보여주고 있다. 따라서 소실점의 좌표 변화를 분석하면 피칭 각도를 알 수 있어 거리계측 오차를 보정하는데 중요한 정보가 된다. 카메라 렌즈의 초점에서 CCD의 임의의 셀을 바라보는 방향을 CCD셀에 대한 시선방향이라고 하면 수평선을 바라보는 시선방향에 맞히는 CCD셀이 영상에서 소실선이 맞히는 좌표들이다. 결국 소실선이 맞히는 시선방향과 도로 평면이 이루는 각은 서로 평행이다. 이러한 관계로 카메라가 움직이는 상태에서 절대적인 각도를 측정하기는 힘들다. 하지만 교정 시 기준이 되는 기하해석을 해 놓으면 소실선이 이루는 교정시와 주행 중의 상대적인 각을 이용하여 도로평면과의 관계를 계산할 수 있다. 그림 9는 피칭 회전이 있을 때 카메라가 수평선을 바라보는 시선의 각도 차이가 피칭 회전각도와 같다는 것을 보여주고 있다.

결국 교정할 때 카메라가 수평선을 바라보는 CCD셀에 대한 시선각도와 주행중의 카메라가 수평선을 바라보는 CCD셀에 대한 시선각도의 차이를 구하면 교정시의 카메라와 현재 주행일 때의 카메라의 피칭 변화량을 계산할 수 있다. 다음 그림 9는 본 실험의 모델에 대한 관점에서 다시 표현하였다.

교정 시에 영상중심을 기준으로 각 영상좌표 점들의 화각을 계산할 수 있는 V.F.을 이용하여 (14)에 의하여 교정할 때와 주행할 때 소실점 v좌표 차이를 계산함으로써 주행 차량의 피칭변화량을 얻을 수 있다.

3. 피칭 각도 변화에 따른 거리오차 보정

계산된 피칭 각도 변화에 따른 계측오차를 보정하기 위하여 그림 8과 같이 오차보정 점을 구한다. 회전축은 카메라 좌표계에 대한 변화량으로 앞의 II절에서 해석한 바와 같다. 결국 카메라 좌표계의 원점을 중심으로 변화량 만큼 회전한 위치를 계산하고 현재 장애물의 위치를 카메라 좌표계의 좌표를 교정 시 카메라 좌표계와 실세계 좌표계 변환 수식 <식-2.38>에 의해 계산하고 그에 대한 다음과 같은 상수를 교정 시점에 계산한다.

- (i) dX_w : 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 X축 방향 이동량
- (ii) dY_w : 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 Y축 방향 이동량
- (iii) dZ_w : 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 Z축 방향 이동량
- (iv) dTh : 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 X축 회전량

그러나 주행 중 카메라는 피칭방향의 변화성분이 발생하며, 계산된 좌표는 그림 8에서의 1번 점과 같이 회전변화가 보정되지 않은 상태에서의 좌표이다. 카메라가 회전하고 카메라 중심에 대한 CCD셀의 도로평면은 회전되지 않은 상태로 교정 데이터에 대해 회전 변화가 있는 것이다. 주행 중 차량에 탑재된 속도, 무게의 변화나 충격으로 위에서 언급한 바와 같은 여러 기하적인 변화가 생기게 되며 이러한 변화는 실제 계산에서의 오차를 발생하게 된다. 그 중 주행

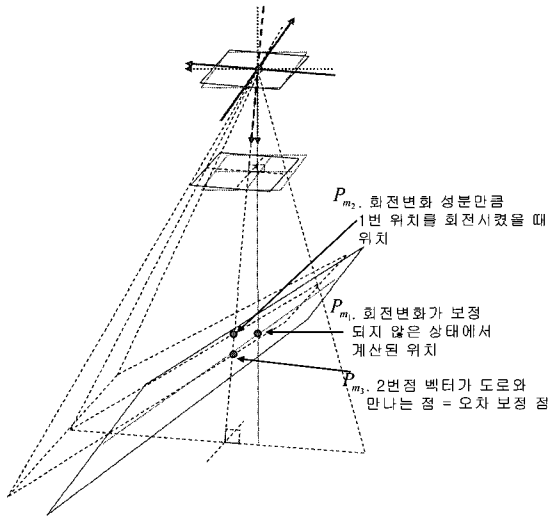


그림 10. 피칭오차 보정 좌표점의 예.
Fig. 10. An example of pitching error correction.

차량의 피칭 변화량의 계산은 중요한 오차 요인으로 미리 교정되어진 상수 값과 해석된 내용을 이용하여 오차를 보정하게 된다.

먼저 소실점을 이용하여 계산된 피칭각도 만큼 그림 8의 P_{m1} 점의 좌표를 (15)를 이용하여 회전시켜 이동되어진 좌표 P_{m2} 을 구한다[22,23].

$$\begin{pmatrix} x_{m2} \\ y_{m2} \\ z_{m2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \\ z_{m1} \end{pmatrix} \quad (15)$$

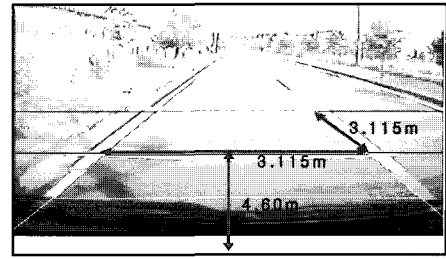
이 P_{m2} 점과 카메라의 중심을 지나는 직선과 평면이 만나는 그림 10의 P_{m3} 점이 실제 좌표가 되며 평면에서의 카메라 위치를 알면 피칭회전에 대한 보정된 좌표의 값을 계산할 수 있다.

V. 실험 및 고찰

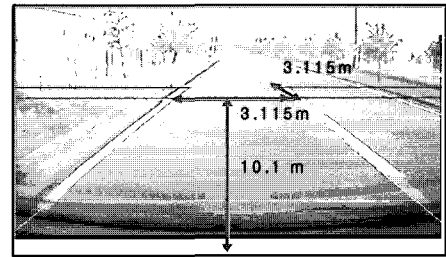
1. 카메라 교정 실험

카메라의 교정을 위한 실험용 교정시트는 실제 도로의 폭과 동일하게 그 간격이 3.115m인 정사각형 모양으로 제작하였다. 교정 실험은 차량에 장착된 카메라의 영상 내에서 교정용 시트의 좌하단점을 기준으로 하여 도로평면과의 실세계 좌표계 교정행렬을 구한 것이다. 교정행렬 계산은 각각 그림 11의 (a),(b)와 같이 설치하여 교정행렬 값을 소수점 4째 자리까지의 정밀도로 파일에 저장하여 실험하였다. II절에서 설명한 알고리즘을 통하여 얻은 교정행렬의 값은 표 1과 같이 각각 교정시트의 위치를 차량의 범퍼에서 4.6m와 10.1m에 설치하고 계산한 결과이다.

추출된 행렬의 정밀도를 확인하기 위하여 시트 영상의 3지점의 영상위치를 두 교정행렬을 이용하여 실세계 위치를 계산하였다. 표 1은 각각 교정용 패턴을 4.6m의 위치와 10.1m의 위치에서 추출된 교정행렬을 이용하여 실세계 위치를 계산한 것이다.



(a) 4.6m



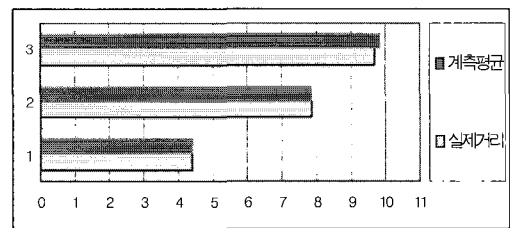
(b) 10.1m

그림 11. 각 교정시트의 위치에 대한 사진.
Fig. 11. The photographs for each calibration sheet.

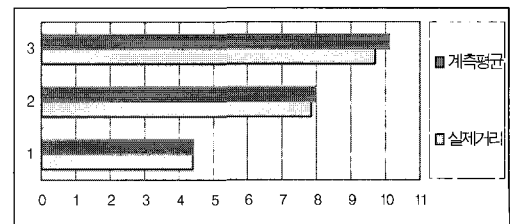
표 1. 교정시트 위치별 교정행렬.

Table 1. Calibration matrix for each position of calibration sheet.

| | | Camera 변수 | | |
|---------------------|--|-------------|-----------|------------|
| 추출된 사영행렬(4.60m) | | -139.5021 | -121.5347 | 56290.8994 |
| | | 0.0 | 386.8734 | -118383.26 |
| | | 0.0 | -240.6847 | 19678.6494 |
| | | Camera 교정행렬 | | |
| 추출된 사영행렬(10.10m) | | -28.2028 | -25.0617 | 11457.9465 |
| | | 0.0 | 175.1731 | -32582.205 |
| | | 0.0 | -49.3896 | 4246.0835 |



(a) 4.6m



(b) 10.1m

그림 12. 실제거리와 계측 결과 비교.
Fig. 12. Comparison between real and measurement distances.

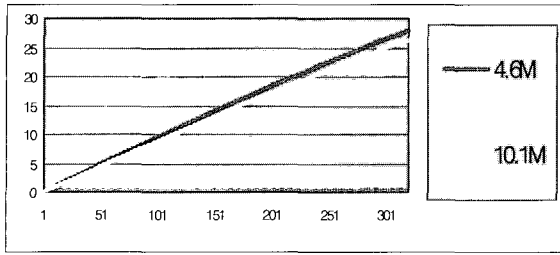


그림 13. 각 교정위치에 대한 오차 특성 비교.
Fig. 13. Error property's comparison between each calibration sheets.

그 결과는 거리가 멀수록 오차의 크기가 점점 커졌으나 동일한 시트가 영상에서 크게 보이는 4.6m에서 교정한 행렬이 보다 좋은 특성을 보였다. 그림 12와 그림 13에서 볼 수 있듯이 도로평면과 카메라의 기하적인 특성상 소실점에 가까울수록 동일한 하나의 픽셀에 대응되는 실세계의 크기는 무한히 커져 그만큼 정밀한 계측이 어렵게 된다.

2. 도로 평면을 이용한 파라미터 추출

다음 표 2는 두 교정행렬에 대한 도로평면과 차량에 설치된 카메라의 기하적인 파라미터들을 추출한 결과를 나타내었다. 이 파라미터는 교정할 때에 미리 계산되어져 인식된 차선과 장애물의 실세계 좌표계를 보정하는데 사용되어진다.

그 결과는 특이하게 4.6m에 놓인 기준 시트로 추출한 교정행렬에 대한 수평화각 값의 오차가 컸다. 먼 거리에 있는 시트를 이용한 계산이 가까운 거리에 있는 시트를 이용한 계산보다 각도계산에 있어서는 보다 나은 결과를 보였다. 그러나 수평화각이 카메라 사양에서 55도 일지라도 영상 캡처보드의 하드웨어 타이밍 셋팅 관계와 샘플링 타임 등 여러 변수에 대해 고려되어진 값은 아니므로 여기서 오차에 대한 정확한 평가는 곤란하다. CCD 평면과 도로평면이 이루는 각은 실세계 좌표계와 카메라 좌표계의 변환에 필요한 변수이며 실제 값은 실험특성상 차량에 설치된 카메라의 CCD 평면에 대한 각도를 측정하기가 곤란하였다. 도로 평면에서 카메라 렌즈의 초점거리까지의 높이 역시 대략적인 측정이 가능하였지만 실험 결과 1cm 정도의 적은 오차를 보였다. 그림 13은 각 CCD셀들과 렌즈의 초점이 이루는 각도와 영상중심과 렌즈초점이 이루는 시선의 각도를 측정된 결과를 나타낸다. 그래프에서 위의 곡선은 4.6m의 가까운 시트를 이용하여 구한 교정행렬을 이용하여 측정된 데이터이고 아래의 곡선은 10.1m의 먼 시트를 이용하여 구한 교정행렬을 이용하여 측정된 데이터이다. 그래프에서 각 CCD셀들의 크기는 동일하나 각도의 증가는 선형적이지 않음을 볼 수 있는데 이것은 영상중심에서 CCD셀의 위치에 대한 단순한 상수의 곱으로 보정계산이 되어 질 수는 없다는 것을 보여준다.

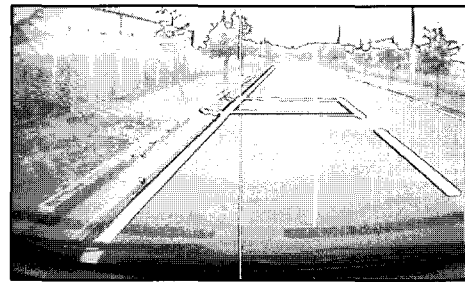
3. 차선 방향과 차의 진행방향 각도(yawing) 오차계측

다음 그림 14는 차선과 주행방향의 요잉 각도 실험을 위한 영상을 보여주고 있고, 실제 각도는 앞뒤 차바퀴 측면의 기준점들 사이의 간격과 차선과의 간격을 이용하여 차량의

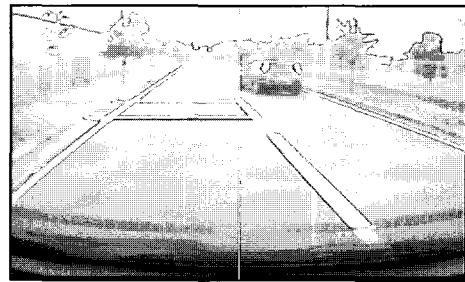
표 2. 두 교정행렬에 의한 파라미터 추출.

Table 2. Parameter extraction by the 2 calibration sheets.

| | 교정행렬 (4.6M) | 교정행렬 (10.1M) | 실제 값 |
|----------------|-------------|--------------|---------|
| 수평화각 | 55.92도 | 55.09도 | 55.00도 |
| 두 평면이 이루는 각도 | 75.32도 | 75.80도 | |
| 도로평면에서 카메라의 높이 | 1.75M | 1.73M | 약 1.74M |



(a) -6.65도



(b) 4.54도

그림 14. Yawing 각도 변화의 예.
Fig. 14. Example of yawing degree variatons.

표 3. 차선과 주행방향에 대한 요잉 각도 계측결과.

Table 3. Measurement result of yawing degree between lane markings and traveling direction.

| 실제각도 | 교정행렬 (4.6M) | 교정행렬 (10.1M) |
|-------|-------------|--------------|
| -6.65 | -7.11 | -6.70 |
| -3.59 | -3.56 | -3.34 |
| 1.16 | 1.00 | 1.19 |
| 4.54 | 5.12 | 5.35 |

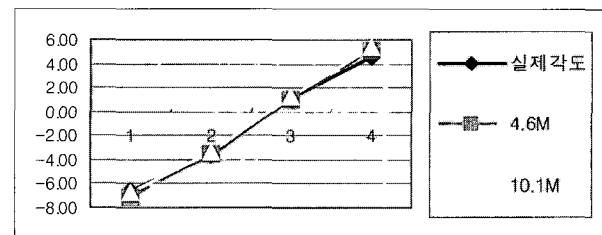
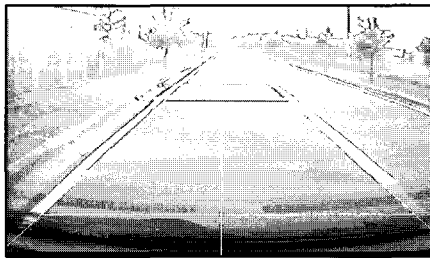


그림 15. yawing 각도 변화에 대한 오차 특성.
Fig. 15. Error property for yawing degree variations.

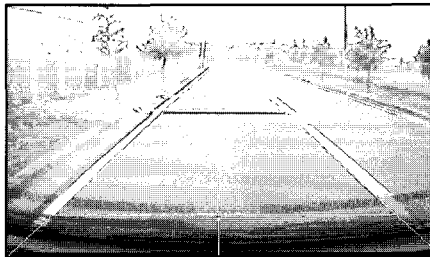
주행방향 각도를 계산하였다. 표 3과 그림 15는 측정된 결과를 보여주고 있다. 결과는 실제 각도보다 많게는 0.5도의 오차를 보였다. 움직인 각도에 비해 무시할 수 있을 정도의 양이다.

4. 거리계측을 위한 피칭 각도변화 계측

다음 그림 16은 교정시의 도로평면과 피칭 각도 변화 실험을 위한 영상을 보여주고 있고, 실제 각도는 앞뒤 차바퀴 측면의 기준점들 사이의 길이와 높이 변화를 이용하여 차량의 피칭방향 변화각도를 계산하였다. 표 4는 교정시트의



(a) 1.04도



(b) -1.08도

그림 16. 피칭각도 변화의 예.

Fig. 16. Example of pitching degree variations.

표 4. 각 교정시점의 도로평면과 피칭 각도 변화 비교.

Table 4. Error properties comparison for pitching degree variations between view points and road plane.

| 실제각도 | 교정행렬 (4.6M) | 교정행렬 (10.1M) |
|-------|-------------|--------------|
| 1.04 | 0.86 | 1.21 |
| 0.41 | 0.09 | 0.52 |
| 0 | -0.33 | 0.11 |
| -0.24 | -0.84 | -0.30 |
| -1.08 | -1.38 | -1.01 |

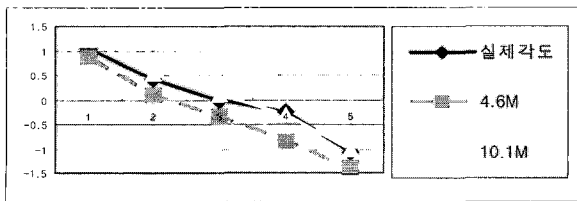


그림 17. 각 교정시트에 대한 피칭각도 오차 특성.

Fig. 17. Error properties of pitching degrees variations for each calibration sheets.

거리가 각각 4.6과 10.1m에 위치할 때의 피칭각도 변화를 계측한 결과를 나타내었고, 그림 17은 이를 그래프로 보인 것이다.

그 결과는 실제 각도보다 많게는 0.6도의 오차를 보였다. 움직인 각도에 비해 무시할 수 없을 정도의 양이지만 실제 각도를 측정하는데 있어서 계산의 정밀도를 위하여 좌측과 우측의 앞뒤 바퀴측의 높이변화를 계측하여 두 개의 각도를 계산하고 그것의 평균을 취하였다. 그런데 제일 오차가 심한 -0.24도의 실제 값은 좌(-0.06도)와 우(-0.42도)의 각도를 평균을 취한 것이다. 그런데 이 경우는 다른 경우보다 좌우측의 계산된 각도의 차이가 많이 발생하였다. 그것은 실험을 위하여 차체를 들어 올릴 때 좌우가 기울어져 생긴 결과이다. 그 외에도 교정 시와 똑같은 피칭상태에서도 0.3도 정도의 오차가 발생하지만 이것은 차선의 소실점을 찾는 영상처리 정도가 픽셀단위의 흔들림이 발생하고 이런 소실점의 위치 변화에 의해서 생기는 오차이다.

5. 피칭에 따른 거리오차 보정

그림 16에 대하여 피칭각도에 의한 오차를 보정하기 위하여 실제 각도는 앞뒤 차바퀴 측면의 기준점들 사이의 길이와 높이 변화를 이용하여 차량의 피칭방향 변화각도를 계산하였고 시트까지의 거리는 차량의 범퍼에서 시트까지의 거리이고 각각 4.6m와 10.1m의 위치에서 실제거리 9.9m를 계측한 결과를 표 5와 그림 18에 보였다.

표 5는 교정시트를 4.6m에 위치하여 추출된 교정행렬을 이용하여 9.90m의 거리에 표준시트를 설치하여 측정된 값이다.

피칭각도 보정 전 측정값은 각도 변화가 작을 때 39cm, 61cm 정도의 계측 오차를 보였고 각도 변화가 클 때는 107cm, 117cm 정도의 계측 오차를 보여 피칭각도 변화에 거리계측 값의 영향이 크게 나타났다. 그러나 피칭각도 보정 후의 거리는 피칭각도 변화가 클 때에도 11cm, 6cm 정

표 5. 실제거리 9.90m에서의 거리 계측 결과(교정시트 : 4.6m).

Table 5. Results of measurement distance at real distance 9.90m (sheet : 4.6m).

| 각도변화 | 실제거리 | 보정 전 거리 (4.6M) | 보정 후 거리 (4.6M) |
|-------|------|----------------|----------------|
| 1.04 | 9.90 | 10.97 | 10.01 |
| 0.41 | 9.90 | 10.29 | 10.20 |
| 0 | 9.90 | 9.87 | 10.21 |
| -0.24 | 9.90 | 9.29 | 10.10 |
| -1.08 | 9.90 | 8.73 | 9.96 |

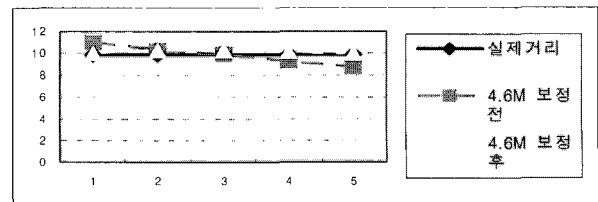


그림 18. 표 5의 그래프.

Fig. 18. The graph for table 5.

표 6. 10.1m의 교정행렬에 대한 거리계측 결과.
Table6. distance measurement result for calibration matrix of 10.1m.

| 각도변화 | 실제거리 | 보정 전 거리 (10.1m) | 보정 후 거리 (10.1m) |
|-------|------|-----------------|-----------------|
| 1.04 | 9.90 | 11.30 | 9.91 |
| 0.41 | 9.90 | 10.60 | 10.04 |
| 0 | 9.90 | 10.09 | 9.98 |
| -0.24 | 9.90 | 9.52 | 9.81 |
| -1.08 | 9.90 | 8.93 | 9.85 |

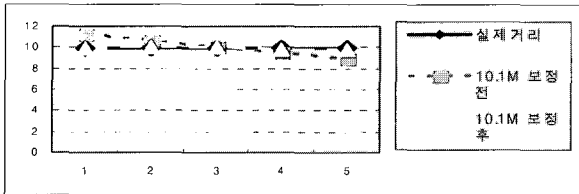
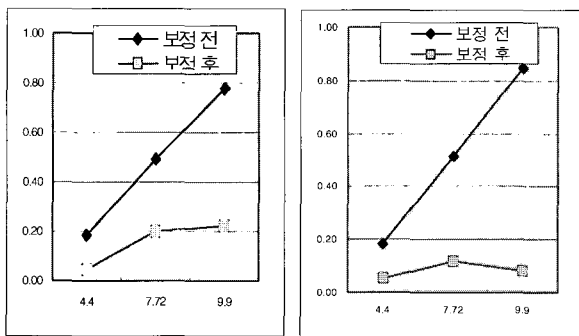


그림 19. 표 6의 그래프.
Fig. 19. The graph of table 6.



(a) Calibration sheet(4.6M) (b) Calibration sheet(10.1M)

그림 20. 각 교정시트의 계측치에 대한 표준편차.
Fig. 20. Standard deviations for the measurement in each calibration sheets.

도로 보정 전에 비해서 계측된 거리 값이 상대적으로 적은 영향을 받았다. 위의 표 6은 교정시트를 10.1m에 위치하여 추출된 교정행렬을 이용하여 동일한 거리 9.90m 위치의 시트를 측정된 값이다.

피칭각도 보정 전 측정값은 각도 변화가 작을 때 70cm, 38cm 정도의 계측 오차를 보였고 각도 변화가 클 때는 140cm, 97cm 정도의 계측 오차를 보여 피칭각도 변화에 거리계측 값의 영향이 크게 나타났다. 하지만 피칭각도 보정 후의 거리는 피칭각도 변화가 클 때에도 1cm, 5cm 정도로 보정 전에 비해서 계측된 거리 값이 상대적으로 적은 영향을 받았다.

그림 19는 표 6을 그래프로 나타낸 것이고, 그림 20의 (a)와 (b)는 실제 거리 값에 대한 두 교정행렬 계측치의 표준편차 값을 그래프로 표시하였다. 그림 20의 (a)는 4.6m의 교정행렬을 이용한 계측 치에서 보정 전 수치의 표준편차는 계측 거리에 따라 0.18, 0.49, 0.78의 결과가 산출되었고

보정 후 수치의 표준편차는 계측 거리에 따라 0.05, 0.20, 0.22의 결과가 산출되어 계측 거리가 멀어짐에 따라 보정 전 계측 값이 피칭 각도 변화에 영향을 많이 받았다.

그러나 보정 후 수치의 표준편차는 안정적으로 수렴하여 피칭각도 변화에 강인한 특성의 결과를 얻었다. 그림 20의 (b)는 10.1m의 교정행렬을 이용한 계측 치이고 보정 전후 수치의 표준편차 역시 같은 특성으로 나타남을 알 수 있다.

VI. 결론

주행하는 차량에서 전방의 상황인식을 위한 도로의 구조를 해석하는 경우에 도로의 굴곡으로 인한 차량의 흔들림으로 말미암아 많은 오차를 감수해야 하므로 신뢰할 만한 정보를 얻기가 쉽지 않다. 이에 본 논문에서는 도로의 구조를 V.F.모델을 이용하여 모델링하여 차량의 진동에 의한 yawing 및 pitching에 의한 오차성분을 실시간으로 보정할 수 있는 계측 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 이용하여 실제계와 카메라 사이의 기하해석을 하였고, 실제계 평면과 영상평면 사이의 기하해석을 수행하여 사영행렬을 추출하였다. 또한 V.F.모델을 이용하여 도로평면과 카메라 좌표계 사이의 교정을 수행하였고, 추출된 사영행렬을 이용하여 영상좌표계에서 도로 평면위의 실제계 좌표계를 계측할 수도 있었으며, 계측 정밀도는 교정 때와 비교하여 도로와 차의 기하적인 변화가 없을 때는 10.1m의 거리를 계측할 때 작게는 0.2m에서 많게는 0.5m의 거의 무시할 수 있을 정도였다.

그러나 기하적인 변화가 있을 때, 특히 0.4도의 작은 피칭회전이 발생하였을 경우에도 10.1m의 거리를 측정하는데 39cm~61cm의 무시할 수 없을 정도의 오차를 보였다. 10.1m의 거리를 측정하는데 1.05도 정도의 피칭회전에서 107cm~117cm의 측정오차를 나타냈으며, 계측 거리가 멀어 질수록 측정오차의 크기는 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 10m 이내의 거리를 측정하는데 보정전의 표준편차 값이 0.2에서 0.8 이상의 값으로 계속 증가한 반면 보정후의 표준편차 값은 0.1에서 증가하여 0.2정도 범위에서 안정적인 특성을 보였다. 이는 전방인식의 유효 탐색거리를 100m 내외로 볼 때 보정전의 시스템은 실효성에 문제가 될 수 있는 수준이지만, 보정후의 시스템은 실효성과 안정성이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다.

이를 바탕으로 본 논문에서 제안된 도로평면 위의 차선이 영상에서 맺히는 소실점의 기하적인 해석을 이용하여 도로 평면과 차의 피칭회전량을 영상처리를 통하여 회전의 변화량을 계측하고 피칭 회전성분에 대한 오차가 포함되어 계산된 장애물의 위치좌표를 계측되어진 방향으로 회전을 시켜 도로 평면과 만나는 점을 구하였고, 그 점과 카메라의 도로평면에서의 위치 사이의 거리를 구하여 보정하였다. 그 결과 0.4~1.05도의 피칭회전 변화가 있을 때 10.1m의 거리를 계측하여 10cm 이하의 계측오차를 결과를 얻을 수 있었고 본 알고리즘이 피칭 변화에 강인함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] F. Chausse, R. Aufrere, and R. Chapuis "Recovering the 3D

- shape of a road by on-board monocular vision," *IEEE*, pp. 325-328, 2000.
- [2] Narayan Srinivasa, "Vision based vehicle detection and tracking method for forward collision warning in automobiles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicle Symposium*, vol. 2, pp. 626-631, June 2002.
- [3] Wlodzimierz Kasprzak, Heinrich Niemann "Adaptive road recognition and ego-state tracking in the presence of obstacles," *International Journal of Computer Vision* 28(1), 5-26, 1998.
- [4] 송재용, 박종웅, 장경영, 이준웅, 장인수, "Machine vision 을 이용한 차선 및 차량거리 검출," 한국 자동차 공학회 논문집, vol. 7, no. 3, pp. 310-320, 1998.
- [5] S. K. Chen, Jayendra S. Parikh, "Developing a forward collision warning system simulation," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000.
- [6] Z. Sun, R. Miller, G. Bebis, and D. DiMeo, "A real time precrash vehicle detection system," *applications of computer vision*, WACV 2002.
- [7] L. Chuanjin, Q. Xiaohu, H. Xiyue, and C. Zhou Xin, "A monocular vision based driver assistance system for collision avoidance," *Proceedings of Intelligent Transportation systems*, vol. 1, 463-468, 2003.
- [8] E. Dagan, O. Mano, G. P. Stein, and A. Shashua, "Forward collision warning with a single camera," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2004.
- [9] K. Kluge and C. Thorpe, "The yarf system for vision based road following," *Mathematical and Computer Modelling*, 1995.
- [10] E. D. Dickmanns and B. D. Mysliwetz, "Recursive 3d road and relative ego-state recognition," *Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992.
- [11] A. Kaske, "Contribution à la detection de bords de route imprecis," *Implantation sur le Robot ROMANE*, Institut National Polytechnique de Lorraine, April 1997.
- [12] A. Kaske, D. Wolf, and R. Husson, "Lane boundary detection using statistical criteria," *In International Conference. on Quality Control by Artificial Vision*, May 1997.
- [13] D. DeMenthon, "Reconstruction of a road by matching edge points in the road image," *In Technical Report CAR-TR-368*, Computer Vision Laboratory for Automation Research, June 1988.
- [14] K. Kanatani and K. Watanabe, "Reconstruction of 3d road geometry from images for autonomous land vehicles," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, Feb. 1990.
- [15] 유클리드 저, 이무현 역, "기하학 원론-공간기하," 교우사, pp. 94-100, 1998.
- [16] E. Lengyel, "Mathematics for 3D game programming & computer graphics," *Charles River Media*, pp. 79-102, 2002.
- [17] E. Lengyel 저/류광 역, "3D 게임 프로그래밍 & 컴퓨터 그래픽을 위한 수학," 정보문화사, 2002.
- [18] 井口征士, 佐藤宏介 공저 "三次元画像計測," 昭晃堂.
- [19] H. Anton 저/이장우 역, "알기쉬운 선형대수," 범한, 2000.
- [20] Y. U. Yim and S.-Y. Oh, "Three feature based automatic lane detection algorithm for autonomous driving," *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 4, December 2003.
- [21] P. Coulombeau and C. Lurgeau, "Vehicle yaw, pitch, roll and 3D lane shape recovery by vision," *IEEE Transactions on Intelligent vehicle*, 2002.
- [22] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple view geometry in computer vision," *Cambridge University Press*, 2000.
- [23] E. Trucco and A. Verri, "Introductory techniques for 3D computer vision," *Prentice Hall*, 1998.



김태효

1977년 2월 영남대 전자공학과(공학사). 1980년 2월 동대학 대학원 전자공학과(공학석사). 1988년 2월 동 대학원 전자공학과(공학박사). 1990년 12월~1991년 12월 펜실바니아대학 박사후과정. 1979년 9월~1999년 2월 경남대학교 전자공학과 교수. 1999년 3월~현재 경남대학교 정보통신공학과 교수. 관심분야는 영상신호처리, 컴퓨터비전, 영상계측, 영상압축.



서경호

1994년 2월 경남대 전자공학과(공학사). 1996년 2월 경남대 대학원 전자공학과(공학석사). 2005년 2월 경남 대학원 전자공학과(공학박사). 2004년 3월~현재 한국폴리텍항공 대학 정보통신과 교수. 관심분야는 영상처리, 컴퓨터비전, 영상계측.