

사진측량 관점에서 차량측량시스템 영상을 이용한 3차원 위치의 정밀도 분석

조우석* · 황현덕**

인하대학교 토목공학과* · 지리정보공학과**

Analysis on 3D Positioning Precision Using Mobile Mapping System Images in Photogrammetric Perspective

Woosug Cho* and Hyoun-Deok Hwang**

Department of Civil Engineering* · Geoinformatic Engineering**, Inha University

Abstract : In this paper, we experimentally investigated the precision of 3D positioning using 4S-Van images in photogrammetric perspective. The 3D calibration target was built over building facade outside and was captured separately by two CCD cameras installed in 4S-Van. After then, we determined the interior orientation parameter for each CCD camera through self-calibration technique. With the interior orientation parameter computed, the bundle adjustment was performed to obtain the exterior orientation parameters simultaneously for two CCD cameras using calibration target image and object coordinates. The reverse lens distortion coefficients were computed and acquired by least squares method so as to introduce lens distortion into epipolar line. It was shown that the reverse lens distortion coefficients could transform image coordinates into lens distorted image coordinates within about 0.5 pixel. The proposed semi-automatic matching scheme incorporated with lens distorted epipolar line was implemented with scene images captured by 4S-Van in moving. The experimental results showed that the precision of 3D positioning from 4S-Van images in photogrammetric perspective is within 2cm in the range of 20m from the camera.

Key Words : 4S-Van, Camera Lens Distortion, Epipolar Line, Image Matching.

요약 : 본 연구에서는 사진측량 관점에서 4S-Van 영상을 이용한 3차원 위치결정의 정밀도를 실험적으로 검증하였다. 실외에 3차원 검정타겟을 설치하고 4S-Van에 탑재된 2대의 CCD카메라로부터 검정타겟 영상을 개별적으로 취득하여 자체검정기법으로 각각의 CCD카메라에 대한 내부표정요소를 개별적으로 정확하게 결정하였다. 이와 같이 얻어진 내부표정요소와 검정타겟의 지상좌표 및 검정타겟을 동시에 촬영한 좌·우측 카메라의 영상좌표를 이용하여 광속조정법으로 2대 CCD카메라의 외부표정요소를 동시에 결정하였다. 또한, 렌즈왜곡이 고려된 에피폴라선을 이용하기 위하여 역렌즈왜곡계수를 최소제곱법을 이용하여 결정하였다. 역렌즈왜곡계수를 이용하여 약 0.5 pixel 이내로 렌즈왜

곡이 포함된 영상좌표로 변환이 가능하였다. 렌즈왜곡이 고려된 에피폴라선을 이용한 반자동 영상매칭을 적용하여 3차원 위치결정의 정밀도를 검증하였다. 실험적으로 촬영거리 20m 이내에서는 대략 2cm 정도의 정밀도를 얻을 수 있었다.

1. 서론

21세기 정보화 사회에서 지형정보는 국가의 중요한 사회간접자본으로 확고한 자리를 잡아가고 있다. 최근 교통, 시설물관리, 도시계획 등 다양한 분야에서 대축척 수치지도의 수요가 크게 증가함에 따라 신속한 제작, 갱신 및 수정에 대한 요구가 늘고 있다. 일반적으로 대축척 수치지도는 항공사진측량이나 토탈스테이션(total station) 등을 이용한 지상측량에 의하여 제작 및 수정, 갱신되고 있다. 그러나 항공사진측량으로는 도심지역의 도로시설물에 대한 상세한 정보획득이 어려우며, 촬영에 많은 제약은 받는 단점이 있다. 또한 지상측량의 경우에도 빈번한 차량과 보행자의 이동으로 도심지역에서는 신속하게 정보를 획득하기 어려운 실정이다.

최근 국내에서는 도심지역의 도로시설물에 대한 정보를 시간과 비용 면에서 효율적으로 획득할 수 있는 차량측량시스템(이하 4S-Van)에 대한 연구가 이루어지고 있다(유복모, 2000; 김병국, 2002; 최중현, 2003). 4S-Van은 도로를 주행하면서 2대

이상의 CCD카메라로부터 도로시설물에 대한 영상을 획득하고, GPS/IMU 및 차속 센서로부터 차량의 위치와 자세 정보를 얻어 도로시설물에 대한 3차원정보 및 지형정보를 획득할 수 있는 모바일 멀티센서 측량시스템이다. 즉 GPS/IMU로부터 2대 이상의 CCD카메라에 대한 외부표정요소가 결정되면, 입체 CCD영상에서 공역점(conjugate point)을 측정하여 전방교회법(space intersection)으로 3차원 위치정보를 얻을 수 있다(El-Sheimy, 1996; Li, 1997). 4S-Van 입체 CCD영상으로부터 정밀한 3차원 위치정보를 얻기 위해서는 4S-Van에 탑재된 CCD카메라의 내부 및 외부 표정요소가 정확하게 결정되어야 한다.

본 연구에서는 실외에 3차원 검정타겟을 설치하고, 4S-Van에 탑재된 2대의 CCD카메라로부터 검정타겟 영상을 개별적으로 취득하여 자체검정기법(self-calibration technique)으로 각각의 CCD카메라에 대한 내부표정요소를 개별적으로 결정하였다. 이와 같이 얻어진 내부표정요소와 검정타겟의 지상좌표 및 검정타겟을 동시에 촬영한 좌·우측 카메라의 영상좌표를 이용하여 광속조정법

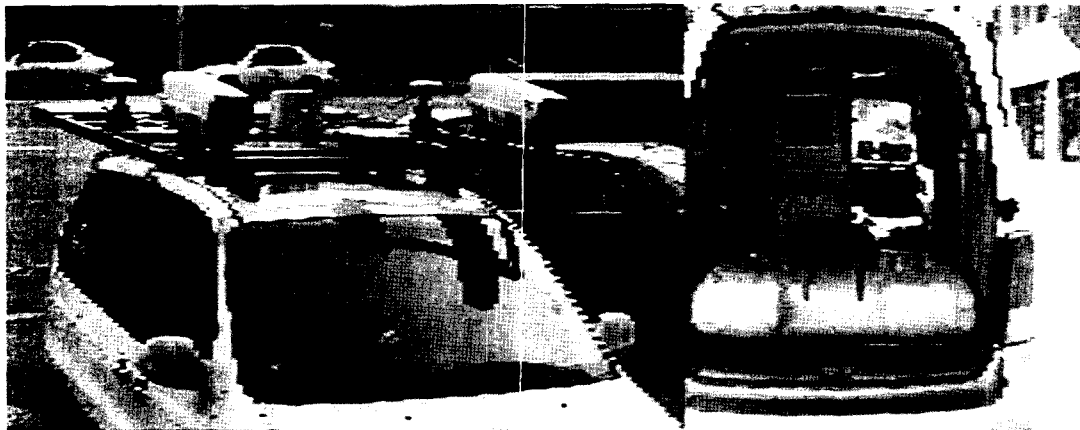


Fig. 1. Hardware equipments installed in 4S-Van system.

(bundle adjustment)으로 2대 CCD카메라의 외부표정요소를 동시에 결정하였다. 또한 CCD카메라의 렌즈왜곡을 고려한 에피폴라기하 및 영상매칭방법을 개발하여 사진측량 관점에서 4S-Van 영상을 이용한 3차원 위치결정의 정밀도를 실험적으로 검증하였다.

2. CCD 카메라의 검정

최근 근거리 사진측량에서 해석적 카메라검정(camera calibration)은 대부분 자체검정기법에 의해 이루어지고 있다(Fraser, 1997; Ellum, 2001). 기존의 카메라검정기법(Brown, 1971; Moffit, 1980; Wolf, 1983)과 달리 자체검정기법은 특별한 장비와 기술 없이도 신속하고 필요에 따라 반복적으로 실시할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 공선조건식과 광속조정법(bundle adjustment)을 기반으로 한 자체검정기법을 적용하였다. 이 방법을 이용하여 현장에서 카메라의 초점거리, 주점의 위치, 렌즈왜곡계수 등 카메라의 내부표정요소를 결정하였다. 렌즈왜곡은 방사왜곡과 편심왜곡 및 In-Plane 왜곡을 고려하였으며, 대상거리의 변화에 따른 왜곡은 고려하지 않았다(Brown, 1971; Fraser 1992). 여기에서 In-Plane 왜곡이란 CCD카메라에서 frame grabber를 이용하여 영상을 획득하는 과정에서 발생할 수 있는 비직교성(non-orthogonality)과 전단변형(shear)의 왜곡을 의미한다(Fraser, 1997). 본 연구에서 적용한 자체검정기법의 기본식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x} + dx_r + dx_d &= -f \frac{r}{q} \\ \bar{y} + dy_r + dy_d + dy_a &= -f \frac{s}{q} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

f : 카메라의 초점거리

$\bar{x} = x - x_o, \bar{y} = y - y_o$

dx_r, dy_r : x, y 방향에 대한 방사왜곡 보정량

dx_d, dy_d : x, y 방향에 대한 편심왜곡 보정량

dy_d : y 방향에 대한 In-Plane 왜곡 보정량

$$r = m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)$$

$$s = m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)$$

$$q = m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L).$$

식(1)을 기반으로 한 자체검정기법으로 방사왜곡계수, 편심왜곡계수, In-Plane 왜곡계수, 초점거리, 주점의 위치가 결정되며 동시에 투영중심의 위치와 자세가 함께 계산된다. 결정된 렌즈왜곡계수를 이용하여 방사왜곡 보정량, 편심왜곡 보정량 및 In-Plane 왜곡 보정량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \\ dx_r &= \bar{x} \frac{\Delta r}{r} = \bar{x} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dy_r &= \bar{y} \frac{\Delta r}{r} = \bar{y} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ r &= \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$dx_d = p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y} \quad (4)$$

$$dy_d = p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$$

$$dy_a = a_1\bar{x} + a_2\bar{y} \quad (5)$$

여기에서,

k_1, k_2, k_3 : 방사왜곡계수

p_1, p_2 : 편심왜곡계수

a_1, a_2 : In-Plane 왜곡계수

r 은 주점으로부터의 방사거리이다.

3. 에피폴라선(Epipolar Line)

1) 에피폴라선

수치사진측량 및 컴퓨터비전에서 영상매칭을 수행하는 경우 탐색영역을 최소화하고 매칭의 효율성 및 정확성을 향상시키기 위하여 에피폴라기하(epipolar geometry)를 이용한다. 입체영상의 외부표정요소가 알려지면 에피폴라기하를 구현할 수 있으며, 이를 바탕으로 공액점(conjugate point)에 대한 에피폴라선(epipolar line)을 얻을 수 있다

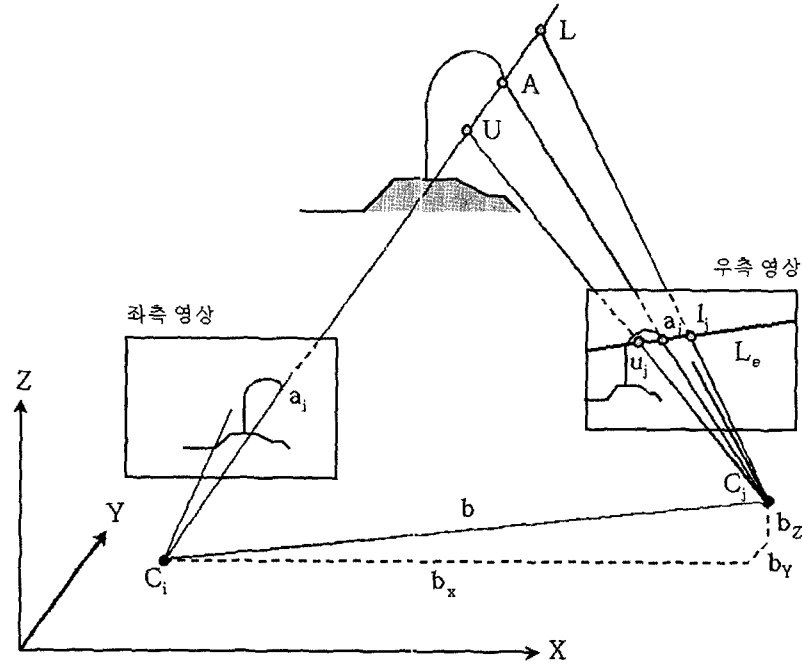


Fig.2 Epipolar geometry(El-Sheimy, 1996).

(Cho, 1992; Schenk, 1999).

El-Sheimy(1996)는 좌측영상에서 임의의 대상물을 선택하면 우측영상에 공액점이 존재하는 에피폴라선을 그릴 수 있도록 공면조건식으로부터 다음과 같이 유도하였다.

우측영상에 대한 공면조건은 다음과 같다.

$$\begin{vmatrix} b_x^{C_i} & b_y^{C_i} & b_z^{C_i} \\ x_a^{C_i} & y_a^{C_i} & z_a^{C_i} \\ \bar{x}^{C_i} & \bar{y}^{C_i} & -f^{C_i} \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

여기에서,

f^{C_i} : 카메라 C_i 의 초점거리

f^{C_j} : 카메라 C_j 의 초점거리

$\bar{x}_a^{C_i}, \bar{y}_a^{C_i}$: 카메라 C_i 영상에서 측정된 임의의 점 a_i 의 사진좌표

$R_{C_i}^{C_j}$: 대상공간(object space)과 카메라 C_j 사이의 회전행렬

$$\begin{pmatrix} b_x^{C_j} \\ b_y^{C_j} \\ b_z^{C_j} \end{pmatrix} = R_{C_i}^{C_j} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} : \text{카메라 } C_j \text{의 좌표계에 대한 기선벡터}$$

$\begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}$: 공간상에서의 C_i 와 C_j 사이의 기선벡터

$\begin{pmatrix} \bar{x}_a^{C_j} \\ \bar{y}_a^{C_j} \\ z_a^{C_j} \end{pmatrix} = R_{C_i}^{C_j} \begin{pmatrix} \bar{x}_a^{C_i} \\ \bar{y}_a^{C_i} \\ -f^{C_i} \end{pmatrix}$: 카메라 C_j 의 좌표계로 변환된 임의의 점 a_i 의 3차원 좌표

$R_{C_i}^{C_j}$: 카메라 C_i 와 C_j 사이의 회전행렬.

에피폴라선 L_e 는 식(6)으로부터 다음과 같이 직선의 방정식으로 유도되어진다.

$$\bar{y}^{C_j} = \frac{y_a^{C_j} b_z^{C_j} - z_a^{C_j} b_y^{C_j}}{x_a^{C_j} b_z^{C_j} - z_a^{C_j} b_x^{C_j}} \bar{x}^{C_j} + \frac{y_a^{C_j} b_x^{C_j} - x_a^{C_j} b_y^{C_j}}{x_a^{C_j} b_z^{C_j} - z_a^{C_j} b_x^{C_j}} f^{C_j} \quad (7)$$

2) 렌즈왜곡을 고려한 에피폴라선

에피폴라선은 식(7)과 같이 직선으로 표현되지만, 렌즈왜곡을 고려하게 되면 임의의 곡선으로 표현된다. 4S-Van에서 얻어진 입체영상을 이용하여 3차원 위치정보를 얻기 위해서는 먼저 좌측영상에서 임의의 대상물에 대한 영상좌표를 측정하

고 사진좌표로 변환한다. 사진좌표로 변환하는 과정에서 2장에서 설명한 렌즈왜곡이 모두 제거된다. 이와 같이 좌측영상에서 렌즈왜곡이 모두 제거된 임의의 영상점에 대한 사진좌표를 이용하여 우측영상에 에피폴라선을 그리면, 우측영상의 렌즈왜곡으로 인하여 에피폴라선은 공액점을 지나가지 않는다.

카메라검정에서 얻어진 렌즈왜곡계수는 임의의 영상점에 대한 왜곡량을 계산하여 이상적인 위치 즉 렌즈왜곡이 제거된 위치로 변환하기 위하여 사용된다. 그러나 위의 경우에는 정반대의 현상이 발생하게 된다. 즉 우측영상에 그려진 에피폴라선은 렌즈왜곡이 제거되어 공액점을 지나가지 않으므로 반대로 렌즈왜곡을 포함시켜 왜곡된 위치로 변환하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위해서 렌즈왜곡이 제거된 위치(undistorted position)에서 렌즈왜곡이 포함된 위치(distorted position)를 계산하기 위한 역렌즈왜곡계수를 결정하였다.

본 연구에서는 카메라검정을 위해 자체검정기법으로 렌즈왜곡계수를 구하였다. 카메라검정에 사용된 검정타겟 영상좌표와 이에 대한 왜곡량을 계산하여 아래와 같은 역렌즈왜곡계수 $k_1', k_2', k_3', p_1', p_2', a_1', a_2'$ 을 미지수로 관측방정식을 조성하고 최소제곱법을 이용하여 결정하였다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= k_1' r'^3 + k_2' r'^5 + k_3' r'^7 \\ dx_d &= p_1'(r'^2 + 2(x_c - x_o)^2) + 2p_2'(x_c - x_o)(y_c - y_o) \\ dy_d &= p_2'(r'^2 + 2(y_c - y_o)^2) + 2p_1'(x_c - x_o)(y_c - y_o) \\ dy_a &= a_1'(x_c - x_o) + a_2'(y_c - y_o) \end{aligned} \quad (8)$$

위와 같은 방법으로 구한 계수를 이용하여 다음과 같이 렌즈왜곡이 포함된 위치를 계산하면 좌·우 영상에서 서로 대응되는 위치에 에피폴라선을 그릴 수 있다. 이와 같이 얻어진 에피폴라선은 식(7)과 같은 직선이 아닌 렌즈왜곡으로 인한 임의의 곡선으로 나타난다.

$$\begin{aligned} x &= x_c + x_o - dx_r' - dx_d' \\ y &= y_c + y_o - dy_r' - dy_d' - dy_a' \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서,

x_c, y_c : 렌즈왜곡이 제거된 사진좌표,

x_o, y_o : 주점좌표

$$\Delta r' = k_1' r'^3 + k_2' r'^5 + k_3' r'^7$$

$$dx_r' = (x_c - x_o) \frac{\Delta r'}{r'} = (x_c - x_o)(k_1' r'^2 + k_2' r'^4 + k_3' r'^6)$$

$$dy_r' = (y_c - y_o) \frac{\Delta r'}{r'} = (y_c - y_o)(k_1' r'^2 + k_2' r'^4 + k_3' r'^6)$$

$$dx_d' = p_1'(r'^2 + 2(x_c - x_o)^2) + 2p_2'(x_c - x_o)(y_c - y_o)$$

$$dy_d' = p_2'(r'^2 + 2(y_c - y_o)^2) + 2p_1'(x_c - x_o)(y_c - y_o)$$

$$dy_a' = a_1'(x_c - x_o) + a_2'(y_c - y_o)$$

4. 정밀 3차원 위치결정

4S-Van은 도로를 주행하면서 GPS/IMU 및 차속 센서로부터 차량의 위치와 자세 정보를 얻어 2대의 CCD카메라에 대한 외부표정요소를 결정한다. 외부표정요소가 결정된 입체 CCD영상에서 임의의 대상물에 대한 공액점을 측정하여 전방회회법으로 3차원 위치정보를 얻을 수 있다(Li, 1997).

본 연구에서는 도로시설물에 대한 정밀 3차원 위치결정을 위하여 4S-Van으로부터 취득된 좌·우측 검정타겟 영상에 대한 영상좌표와 3차원 검정타겟의 지상좌표를 정규화하였다. 그리고 정규화된 영상 및 지상좌표를 이용하여 CCD카메라의 내부표정요소는 자체검정기법으로 외부표정요소는 광속조정법으로 정확하게 결정하였다. 또한, 렌즈왜곡이 고려된 에피폴라선을 이용하므로 공액점의 위치를 정확하게 측정할 수 있다. 또한 공액점의 측정을 두 가지 방법 즉 수동입력과 영상매칭으로 구분하여 적용하였으며, 전체적인 작업 흐름도는 다음 그림과 같다.

먼저 좌측영상에서 임의의 대상물에 대한 영상좌표를 측정하면 내부표정요소를 이용하여 사진좌표로 변환하고, 우측영상에는 렌즈왜곡이 포함된 곡선형태의 에피폴라선이 그려진다. 이론적으로 우측영상의 에피폴라선상에 좌측영상의 공액점이 존재해야 하므로 작업자는 우측영상의 에피

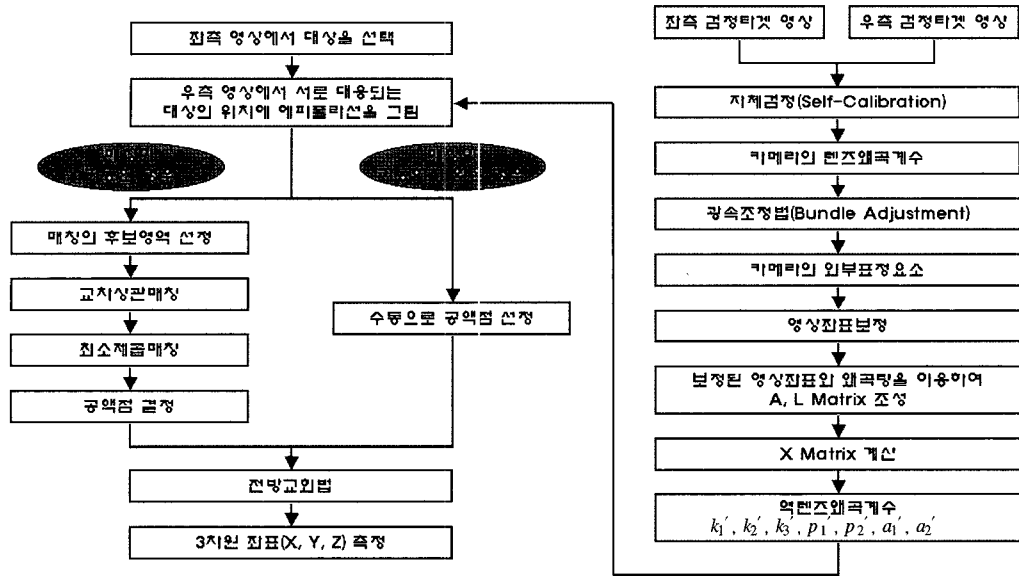


Fig.3 Work flow for 3D positioning.

폴라선상이나 부근에서 공역점의 좌표를 측정한다. 공역점의 좌표가 입력되면 먼저 교차상관매칭(cross correlation matching)을 적용하여 공역점의 좌표를 계산한다. 교차상관매칭에서 얻어진 공역점의 좌표는 다시 최소제곱매칭의 초기값으로 하여 정밀한 공역점의 위치를 부화소(subpixel) 단위로 측정한다(Schenk, 1999). 최소제곱매칭에서 얻어진 우측영상 공역점의 좌표는 사진좌표로 변환되어 전방교회법으로 3차원 위치정보를 얻을 수 있다. 만약 매칭이 실패하게 되면 작업자가 수동으로 입력한 좌표를 이용하여 3차원 위치를 결정한다.

영상매칭을 두 단계로 나누어 적용한 이유는 CCD카메라의 외부표정요소가 부정확한 경우, 조측영상의 공역점이 우측영상의 에피폴라선상으로부터 많이 이격될 수 있기 때문이다. 잘 알려진 바와 같이 최소제곱매칭은 초기값이 5~7 픽셀이 내에 있지 않으면 발산하는 성향이 있으므로 영상매칭의 신뢰성을 위해 교차상관매칭을 먼저 수행하였으며 정확성을 위해 최소제곱매칭을 적용하였다.

5. 실험결과 및 분석

1) 카메라검정

본 연구에서 사용한 4S-Van은 이엔지정보기술(주)에서 개발한 시스템으로 2대의 Trimble 5700 GPS와 Litton사의 LN200 IMU 및 2대의 CCD카메라를 장착하고 있다. 사용된 CCD카메라의 해상도는 1392×1040, 셀 크기는 4.65μm×4.65μm, 초점거리는 12mm이다.

카메라검정을 위해 3차원 검정타겟을 벽면에 설치하였다. 검정타겟은 원형타겟으로 지름 5cm로 제작하고, 타겟 내부에 3mm 두께의 십자선이 있다. 또한 타겟은 평면타겟과 입체타겟으로 구분하였으며, 입체타겟은 길이 30cm, 20cm, 10cm로 구분 지어 제작하였다. 81개의 평면타겟과 36개의 입체타겟을 사용하여 총 117개의 검정타겟을 설치하였으며, 타겟 부착면은 가로 방향 2.5m, 세로 방향 2.0m가 되도록 구성하였다. 설치된 검정타겟에 대한 측량은 GPS 장비와 토달스테이션을 이용하여 정밀한 3차원 좌표를 획득하였다. Fig. 4는 카메라검정을 위한 검정타겟의 배치를 보여주고 있다.

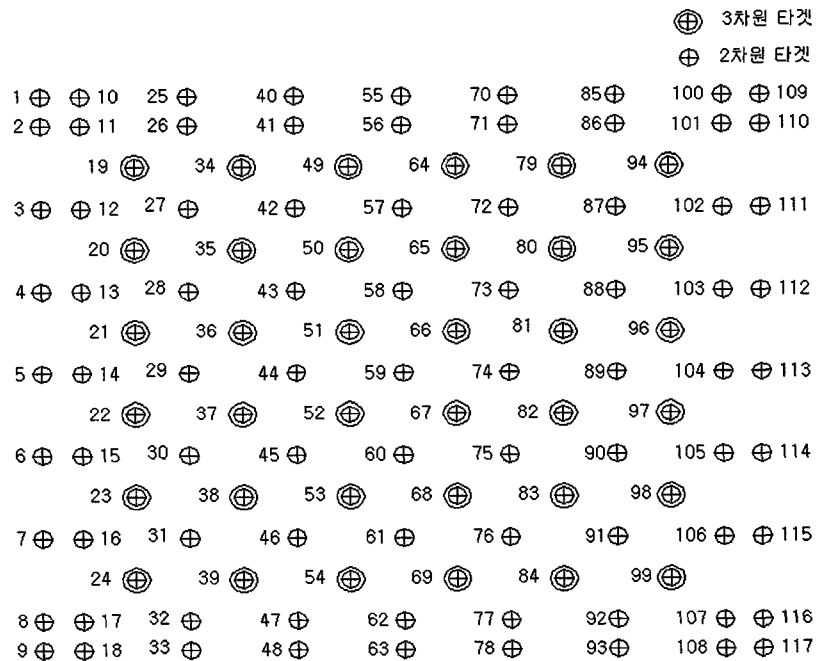


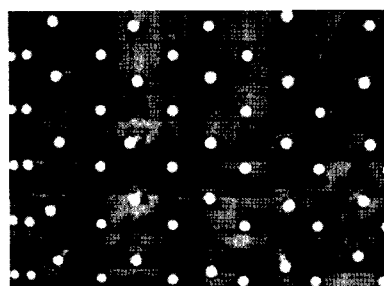
Fig.4 Schematic diagram for target distribution.

4S-Van의 경우 CCD카메라의 검정은 일반적으로 매번 현장촬영 전에 실시한다. Fig. 5는 2003년 11월 18일 현장촬영 전에 검정타겟 3~4m 전방에서 좌·우측 카메라로 동시에 촬영하지 않고 개별적으로 촬영한 검정타겟 영상이다.

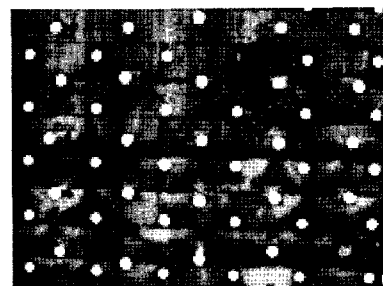
좌·우측 검정타겟 영상에는 각각 54와 53개의 타겟이 촬영되었으며, 이를 이용하여 카메라검정을 실시하였다. Table 1은 자체검정기법에 의해 얻어진 좌·우측 카메라의 내부표정요소를 보여주고 있다. 두 대의 CCD카메라의 주점위치는 일반적으로 알려진 것만큼 이동되어 있으며, 초점거

리는 약간 길게 계산되었다(Ellum, 2001).

Fig. 6에서 좌·우측 카메라에 대한 방사왜곡은 가장자리에서 최대 18~21 pixel로 비슷하며 왜곡 형태도 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 7과 8에서 편심왜곡과 In-Plane 왜곡은 사분면에 따라 다르게 나타나고 있으며, 편심왜곡 형태도 전혀 다르게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 일반적으로 알려진 것처럼 편심왜곡과 In-Plane 왜곡은 방사왜곡에 비해 아주 미소하다는 것을 볼 수가 있다. 편심왜곡과 In-Plane 왜곡이 미소하기 때문에 무시하여도 큰 문제가 되지 않을 수도 있



(a) left image



(b) right image

Fig 5. Target images for CCD camera calibration.

Table 1. IOP from self-calibration.

IOP	Left Camera	Right Camera
$f(\text{mm})$	12.304422	12.263031
$x_p(\text{mm})$	0.08612187	0.08238111
$y_p(\text{mm})$	-0.10300317	0.0666648
k_1	0.01563345	0.01753838
k_2	-0.002447065	-0.004578136
k_3	0.001258577	0.001875052
p_1	-0.00001948121	0.0001138966
p_2	0.000213876	0.0001612489
a_1	0.0002881804	-0.0002056577
a_2	-0.0009564119	-0.0007500529

지만, 본 연구에서는 정밀측정을 위하여 모두 고려하였다.

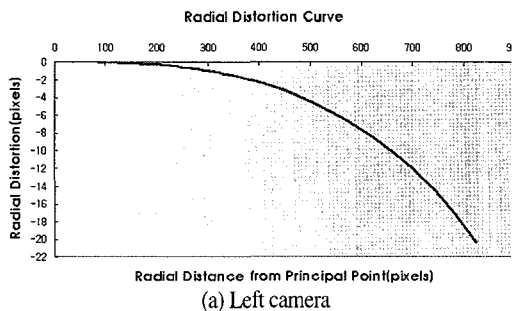
또한 Fig. 9에서 카메라의 방사왜곡의 형태는 모두 barrel distortion(negative distortion)을 나타내고 있는 것을 볼 수가 있다. 그리고 Fig. 10은 편심왜곡의 형태를 보여주고 있으며, 크기가 매우 미소하기 때문에 과장하여 나타내었다. 편심왜곡

은 비대칭적 방사왜곡(asymmetric radial distortion)과 접선왜곡(tangential distortion)으로 구성되며, 접선왜곡은 최대 접선왜곡의 축에서 보는 바와 같이 축의 수직방향으로 접선왜곡이 많이 나타내는 것을 볼 수 있다.

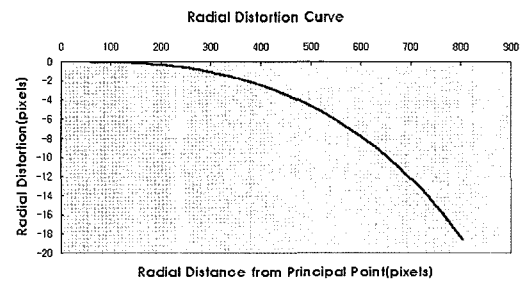
본 연구에서는 자체검정기법을 적용하여 각각의 CCD카메라에 대한 내부표정요소를 개별적으로 정확하게 결정하였다. 이와 같이 얻어진 내부표정요소와 3차원 검정타겟의 지상좌표 및 검정타겟을 동시에 촬영한 좌·우측 카메라로부터 얻어진 영상의 영상좌표를 이용하여 광속조정법으로 2대 CCD카메라의 외부표정요소를 동시에 결정하였다. Table 2는 광속조정법에 의한 좌·우측 카메라의 외부표정요소를 보여주고 있다.

2) 렌즈왜곡을 고려한 에피폴라선

카메라의 렌즈왜곡을 고려한 곡선형태의 에피폴라선을 우측영상에 그리기 위해서는 렌즈왜곡이 제거된 위치에서 렌즈왜곡이 포함된 위치로 변환시키는 역렌즈왜곡계수가 우측영상에 대해서만

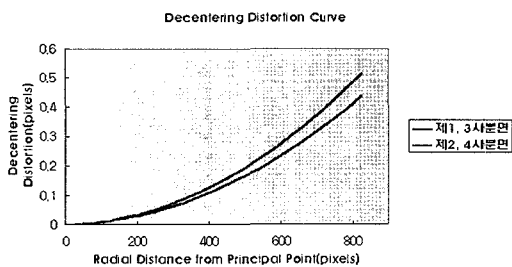


(a) Left camera

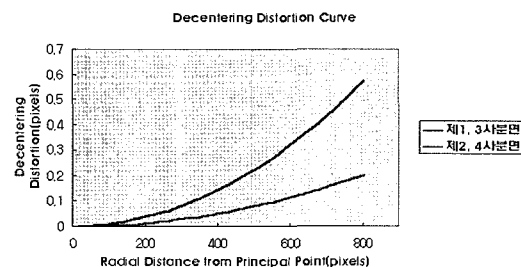


(b) Right camera

Fig. 6 Radial distortion curve.



(a) Left camera



(b) Right camera

Fig. 7 Decentering distortion curve.

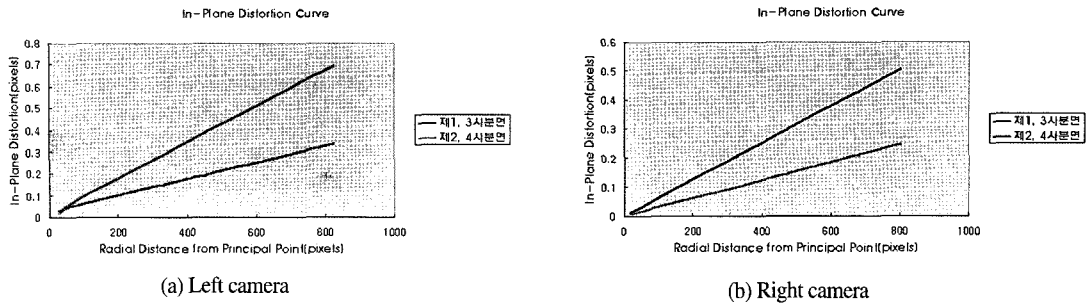


Fig. 8 In-Plane distortion curve.

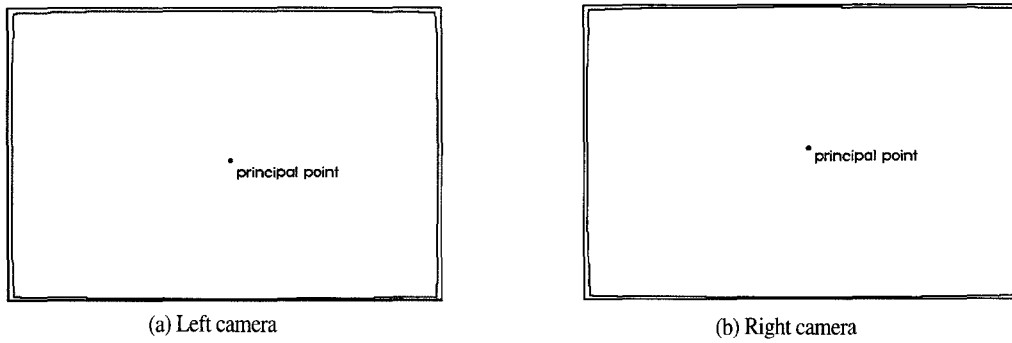


Fig. 9 Radial distortion.

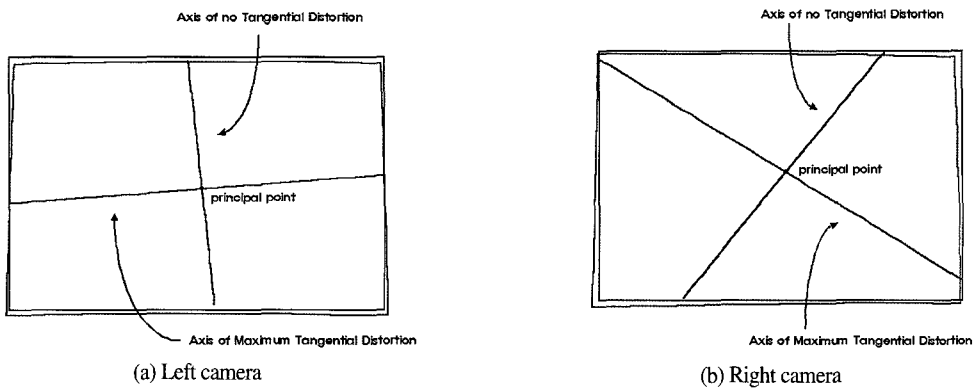


Fig. 10. Decentering distortion.

필요하다. 카메라 자체검정기법에 의해 얻어진 우측영상의 렌즈왜곡계수와 렌즈왜곡계수를 구하기 위해 사용된 우측 검정타겟의 53개 영상좌표를 이용하여 역렌즈왜곡계수 $k_1', k_2', k_3', p_1', p_2', a_1', a_2'$ 을 최소제곱법을 이용하여 결정하였다. Table 3은 우측영상에 대한 역렌즈왜곡계수를 나타낸다.

역렌즈왜곡계수가 렌즈왜곡이 제거된 위치에서 렌즈왜곡이 포함된 위치로 얼마나 정확하게 변환

Table 2. EOP from bundle adjustment.

EOP	Left Camera	Right Camera
X(m)	233002.475326	233001.320403
Y(m)	319904.783829	319905.657479
Z(m)	51.631730	51.664825
Omega(rad)	-1.4497152	-1.466375
Phi(rad)	0.7411407	0.674483
Kappa(rad)	3.1009711	3.111984

Table 3. Reverse lens distortion coefficients for right image.

Reverse lens distortion coefficients	Value for right image
k_1'	0.017696267
k_2'	-0.00549131
k_3'	0.001869160
p_1'	0.000108875
p_2'	0.000153067
a_1'	-0.000200527
a_2'	-0.000733462

하는지를 검증하기 위하여 우측 검정타겟의 53개 영상좌표를 이용하였다. 먼저 53개 검정타겟의 영상좌표를 자체검정기법에 의해 얻어진 렌즈왜곡 계수를 이용하여 렌즈왜곡이 제거된 사진좌표로 변환하였다. 그런 연후에 변환된 사진좌표를 다시 역렌즈왜곡계수를 이용하여 렌즈왜곡이 포함된 영상좌표로 변환하여 원 영상좌표와 비교하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 평균제곱근오차는 $\pm 0.4306(\text{pixel})$, $\pm 0.2377(\text{pixel})$ 이며, 약 0.5 pixel 이내로 변환된다는 것을 알 수 있었다. 그리고 최대오차는 약 1 pixel까지 나타나는 것을 볼 수 있으며, 최대오차를 갖는 검정타겟은 왜곡이 많은 영상의 가장자리 부근에 위치한 타겟이다.

Fig. 11은 역렌즈왜곡계수를 이용하여 좌측 검정타겟 영상에서 측정된 임의의 한 영상점에 대해 렌즈왜곡이 고려된 에피폴라선을 우측 검정타겟 영상에 그린 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 좌측영상에서 임의의 타겟중심을 측정할 경우 렌즈왜곡이 고려되지 않으면 에피폴라선이 우측영상에서 대응하는 타겟의 중심을 지나가지 않는다. 그러나 본 연구에서 개발한 역렌즈왜곡계수를 이용하여 렌즈왜곡을 고려하는 경우에는 에피폴라선이 우측영상에서 대응하는 타겟의 중심을 지나가게 된다. Fig. 12는 현장영상에 동일한 역렌즈왜곡계수를 적용한 결과를 보여준다.

3) 3차원 위치결정

본 연구에서 제안한 3차원 위치결정방법은 에

Table 4. Accuracy of reverse lens distortion coefficients.

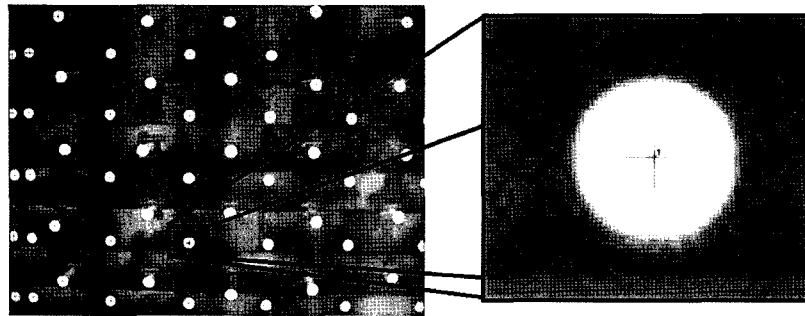
	Errors in right calibration target image		
	RMSE	Max. Error	Min. Error
x(pixel)	± 0.4306	0.9380	0.0004
y(pixel)	± 0.2377	0.6703	0.0019

피폴라선을 이용한 반자동 영상매칭이다. 다시 말해서 작업자가 좌측영상에서 임의의 영상점을 측정 후, 우측영상에서 공액점을 에피폴라선상이나 부근에서 측정하면 영상매칭에 의하여 정밀한 3차원 위치를 결정한다.

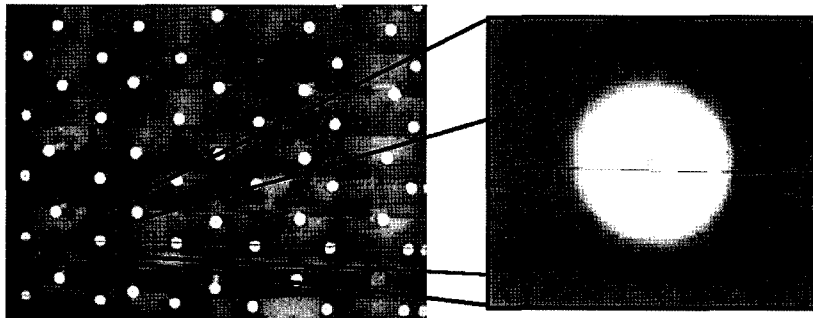
본 연구에서 사용한 검정타겟 영상은 2003년 11월 18일 현장촬영 전에 촬영하였으며, 현장영상은 같은 날 대전광역시 서구지역을 대상으로 약 40 km/h로 주행하면서 획득하였다. 교차상관매칭에서 템플릿의 크기는 $29 \times 29(\text{pixel})$ 이며, 탐색윈도우의 크기는 $45 \times 45(\text{pixel})$ 를 이용하였다. 또한 최소제곱매칭의 윈도우 크기는 $29 \times 29(\text{pixel})$ 를 이용하였다. Fig. 13은 본 연구에서 적용한 반자동 영상매칭의 결과를 보여준다. 그림에서 나타난 것처럼 공액점을 어느 정도 이격하여 입력하여도 영상매칭이 정확하게 우측영상의 공액점을 찾은 것을 볼 수가 있다.

본 연구에서 개발한 3차원 위치결정방법의 정밀도를 실험적으로 검증하기 위하여 여러 영상에 적용해 보았으며, 대부분 비슷한 결과를 얻었다. 본 논문에서는 Fig. 14를 이용하여 결과를 설명하고자 한다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 13개 지점에 대하여 3차원 좌표를 취득하였다. 1번, 2번, 4번, 8번~10번 점은 영상매칭이 용이한 지점이며, 3번과 5번 점은 두 카메라의 촬영위치에 따른 폐색 및 foreshortening이 발생하여 영상매칭이 어려운 지점이다. 또한 6번, 7번, 11~13번 점은 특별한 텍스처가 없어서 영상매칭이 불가능한 지점이다.

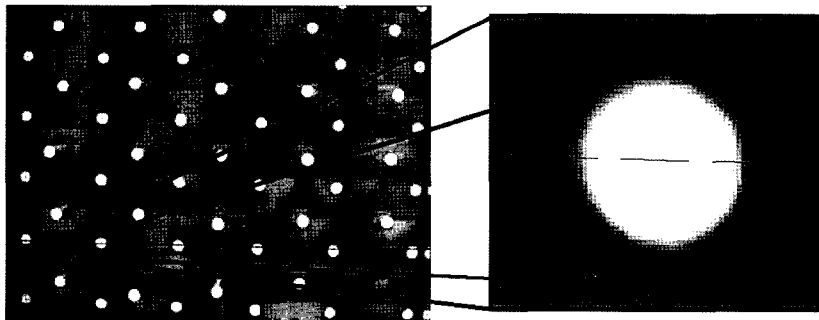
본 연구에서 개발한 3차원 위치결정방법을 적용한 결과, 1~4번, 8~10번 점은 모두 영상매칭이 가능하였다. 그러나 5~7번, 11~13번 점은 영상매칭이 불가능하여 수동으로 에피폴라선상에서 공



(a) Center-positioned target in left target image



(b) Epipolar line drawn onto right target image without lens distortion



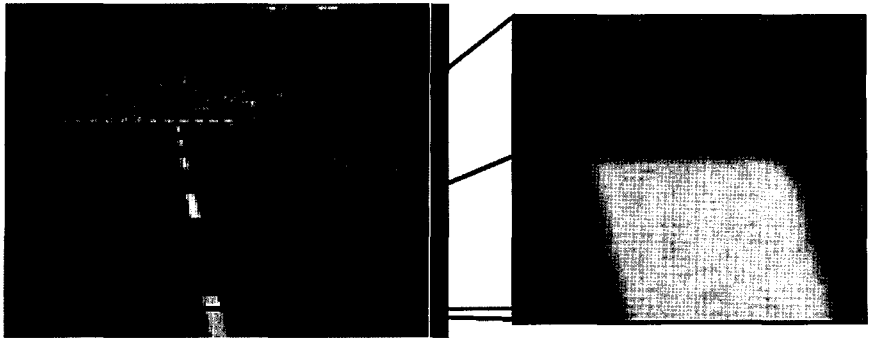
(c) Epipolar line drawn onto right target image with lens distortion

Fig. 11. Epipolar line drawn onto left target image.

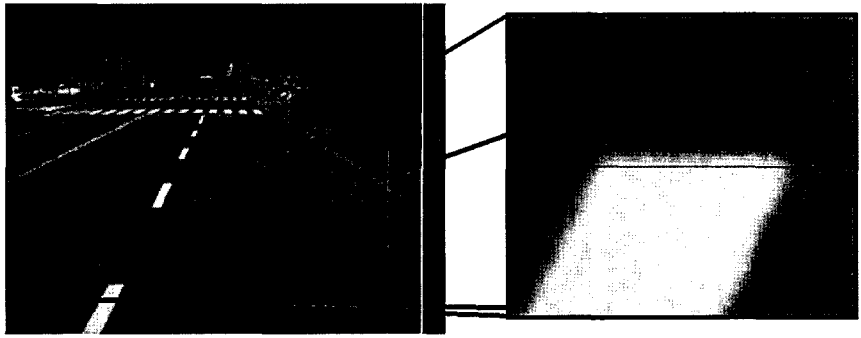
액점을 선정하여 3차원 좌표를 취득하였다. Fig. 14에서 선택한 13개 지점의 3차원 위치에 대한 정밀도는 Table 5와 같다.

Table 5에서 S_0 는 3차원 좌표를 추출하기 위해 측정된 영상좌표의 측정 정밀도를 나타내며, S_x , S_y , S_z , S_{xyz} 는 각각 추출된 지상좌표의 X축, Y축, Z축, 그리고 3차원 좌표에 대한 정밀도를 나타낸다. 그리고 Horizontal Distance는 4S-Van의 카메라와 측정대상 간의 수평거리이다.

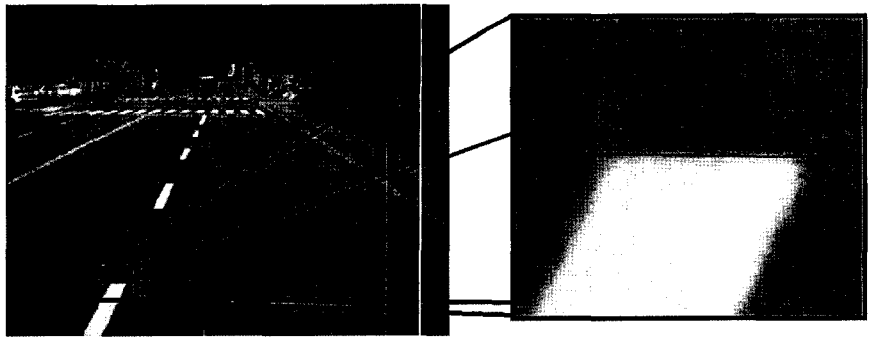
1번~4번, 8번~10번 지점은 영상매칭에 의해서 찾은 공액점을 이용하여 3차원 좌표를 취득한 것으로 매우 정밀하게 공액점을 찾는다는 것을 볼 수 있다. 그러나 5번~7번, 11번~13번 지점은 영상매칭이 불가능하여 에피폴라선상에서 수동으로 얻어진 공액점으로 영상매칭보다 정밀도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 14에서 상단 영상은 촬영방향이 X축 방향이므로 거리가 멀어질 수록 S_x 가 하단 영상에서는 촬영방향이 Y축 방향



(a) Measured target in left scene image



(b) Epipolar line drawn onto right scene image without lens distortion



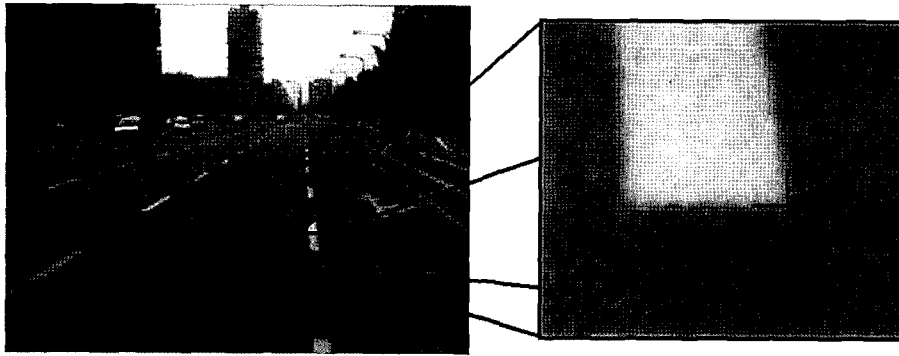
(c) Epipolar line drawn onto right scene image with lens distortion

Fig. 12. Epipolar line drawn onto left scene image.

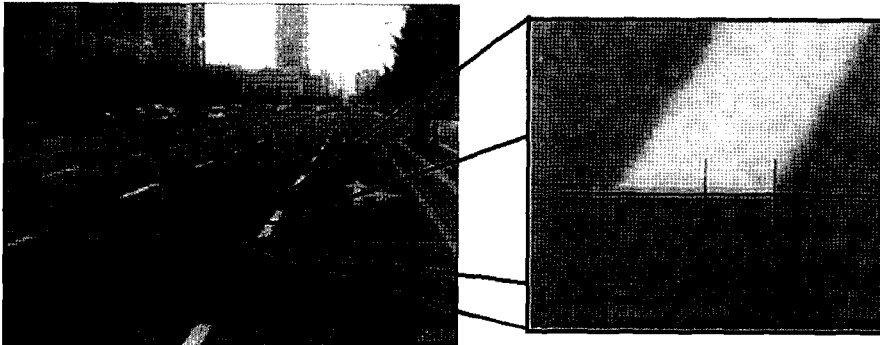
이므로 거리가 멀어질수록 S_y 가 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 결론적으로, 사진측량관점에서 본 연구에서 제안한 방법으로 촬영거리 20m 이내에서는 공간대상물을 대략 2~3 cm 정도의 정밀도로 4S-Van의 영상을 이용하여 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 사진측량 관점에서 4S-Van 영상을 이용한 3차원 위치결정의 정밀도를 실험적으로 검증하였다. 실외에 3차원 검정타겟을 설치하고 4S-Van에 탑재된 2대의 CCD카메라로부터 검정타겟 영상을 개별적으로 취득하여 자체검정기법으

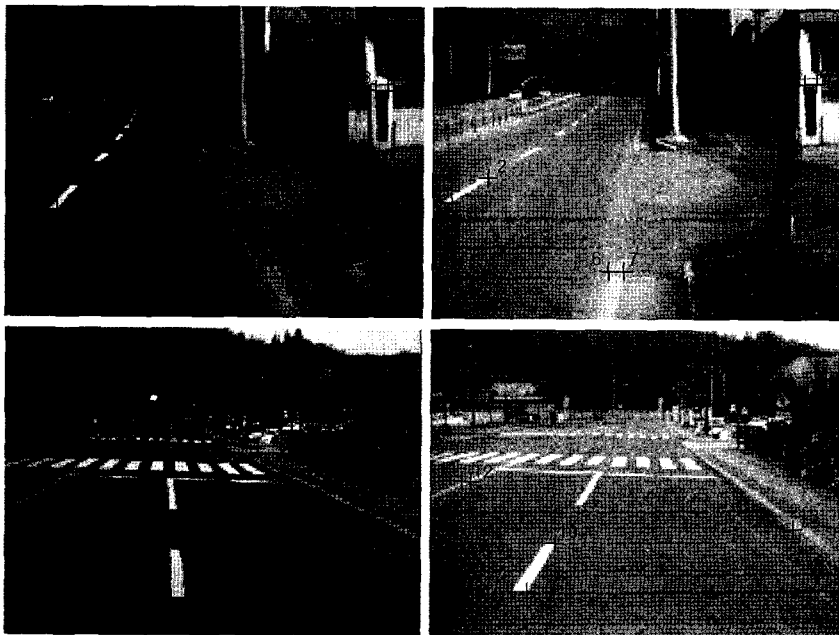


(a) Left scene image



(b) Right scene image

Fig. 13. Matching result obtained by the proposed method.



(a) Left scene image

(b) Right scene image

Fig. 14. Scene image with measurements for 3D positioning.

Table 5. 3D positioning precision for 4S-Van scene image.

ID	S_0 (pixel)	S_x (cm)	S_y (cm)	S_z (cm)	S_{xyz} (cm)	Horizontal Distance(m)
1	0.12687	0.788	0.162	0.165	0.821	12.97
2	0.09328	0.888	0.147	0.155	0.913	16.07
3	0.10642	2.042	0.470	0.104	2.098	22.61
4	0.11991	2.299	0.562	0.116	2.369	22.58
5	0.18972	0.348	0.065	0.113	0.372	6.870
6	0.29891	0.753	0.073	0.227	0.790	8.110
7	0.23690	0.603	0.064	0.182	0.633	8.140
8	0.16525	0.045	0.413	0.108	0.43	8.176
9	0.16635	0.042	0.42	0.11	0.436	8.204
10	0.11699	0.04	0.555	0.106	0.566	11.28
11	0.19933	0.503	2.559	0.315	2.627	18.79
12	0.23188	0.568	3.017	0.369	3.092	18.91
13	0.19937	0.396	1.715	0.218	1.774	15.04

로 각각의 CCD카메라에 대한 내부표정요소를 개별적으로 정확하게 결정하였다. 2대 카메라에 대한 방사왜곡의 형태는 모두 barrel distortion이며, 가장자리에서 최대 18~21 pixel로 비슷하였다. 그러나 편심왜곡과 In-Plane 왜곡은 미소하지만 사분면에 따라 다르게 나타났으며, 편심왜곡형태도 전혀 다르게 나타났다. 이와 같이 얻어진 내부표정요소와 검정타겟의 지상좌표 및 검정타겟을 동시에 촬영한 좌·우측 카메라의 영상좌표를 이용하여 광속조정법으로 2대 CCD카메라의 외부표정요소를 동시에 결정하였다. 또한, 렌즈왜곡이 고려된 에피플라션을 이용하기 위하여 역렌즈왜곡계수를 최소제곱법을 이용하여 결정하였다. 역렌즈왜곡계수를 이용하여 약 0.5 pixel 이내로 렌즈왜곡이 포함된 영상좌표로 변환이 가능하였다. 렌즈왜곡이 고려된 에피플라션을 이용한 반자동 영상매칭을 적용하여 3차원 위치결정의 정밀도를 검증하였다. 실험적으로 영상매칭이 수작업보다 정밀하게 나타났으며, 사진측량관점에서 촬영거리 20m 이내에서는 대략 2cm 정도의 정밀도를 얻을 수 있었다.

참고문헌

유복모 외, 2000. 수치사진측량기법과 GPS를 이용한 실시간 사진측량시스템개발 연구보고서, R&D/96-0096, 건설교통부/건설기술연구원.

정동훈, 김병국, 2002. 차량측량시스템을 위한 영상취득 프로그램 개발, 2002 공동춘계학술대회논문집, 대한원격탐사학회, pp. 43-47.

최종현, 2003. 모바일 매핑을 위한 4S-Van 시스템 개발, 박사학위논문, 충남대학교.

황현덕, 2004. 4S-Van 영상을 이용한 정밀 3차원 위치결정에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교.

Brown, D. C., 1971. Close-Range Camera Calibration, *Photogrammetric Engineering*, 37(8): 855-866.

Cho, W. and T. Schenk, 1992. Resampling Digital Imagery to Epipolar Geometry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(3B): 37-43.

Ellum, C. M., 2001. *The Development of a Backpack Mobile Mapping System*, M.Sc. Thesis, UCGE

- Report No. 20159, pp. 13-67.
- El-Sheimy, N., 1996. *The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications*, Ph. D. thesis, UCGE Report No. 20101, pp. 32-92, 120-123.
- Fraser, C. S., 1992. Variation of Distortion within the Photographic Field, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 58(6): 851-855.
- Fraser, C. S., 1997. Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52: 149-159.
- Li, R., 1997. Mobile Mapping: An Emerging Technology for Spatial Data Acquisition, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(9): 1085-1092.
- Moffit, F. H. and E. M. Mikhail, 1980. *Photogrammetry*, Series in Civil Engineering, Harper & Row, New York, 3rd ed.
- Schenk, T., 1999. *Digital Photogrammetry Volume I*, TerraScience, pp. 232-266.
- Wolf, P. R., 1983. *Elements of Photogrammetry*, McGraw-Hill, Inc., New York, 2nd ed.