

논문 2008-45SC-3-3

단일 카메라를 이용한 보행자의 높이 및 위치 추정 기법

(Estimation of Human Height and Position using a Single Camera)

이 석 한*, 최 종 수**

(Seok-Han Lee and Jong-Soo Choi)

요 약

본 논문에서는 단일 카메라를 이용하여 영상 내에 존재하는 객체의 3차원 공간 상에서의 위치 및 높이를 추출하기 위한 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 영상으로 사영된 3차원 장면(scene)에 대한 기준 좌표계를 마커(marker)를 이용해서 설정한 다음, 대상 물체의 2차원 영상을 기준 좌표계로 직접 역사영(back-projection) 시킴으로써 대상 물체에 대한 3차원 공간에서의 위치 및 높이를 계산한다. 그리고 부정확한 카메라 교정으로 인하여 발생하는 역사영 오차를 마커의 기하학 정보를 이용해서 보정한다. 제안된 방법은 기존의 방법에서 주로 이용되던 소실점(vanishing point) 및 소실선(vanishing line) 등을 이용하지 않으며, 3차원 공간 내에서의 객체의 높이 및 위치의 동시 추정이 가능한 장점이 있다. 또한 단일 카메라만을 이용하여 필요한 위치 및 높이 정보를 추출하기 때문에 다중 카메라를 이용한 기법에서 발생할 수 있는 3차원 좌표계 상에서의 대응점의 모호성, 다수의 카메라를 정확히 교정시켜야 하는 어려움 등의 문제가 발생하지 않는다. 실험 결과를 통하여 제안된 기법의 정확도 및 안정성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a single view-based technique for the estimation of human height and position. Conventional techniques for the estimation of 3D geometric information are based on the estimation of geometric cues such as vanishing point and vanishing line. The proposed technique, however, back-projects the image of moving object directly, and estimates the position and the height of the object in 3D space where its coordinate system is designated by a marker. Then, geometric errors are corrected by using geometric constraints provided by the marker. Unlike most of the conventional techniques, the proposed method offers a framework for simultaneous acquisition of height and position of an individual resident in the image. The accuracy and the robustness of our technique is verified on the experimental results of several real video sequences from outdoor environments.

Keywords: Height estimation, Position estimation, Human tracking, Camera calibration, Video surveillance

I. 서 론

영상 내에 존재하는 사용자의 3차원 정보를 계산한 다음 이를 사용자의 추적 또는 인식에 이용하고자 하는 기술은 RFID, GPS 등과 같은 부가적인 장비 없이 단순한 CCD 카메라 영상만을 이용하여 사용자의 신체에 대한 3차원 정보의 취득 및 분석을 가능하게 하며, 최근

각광받고 있는 직관적 인터페이스(perceptual interface), 지능형 비디오 감시 장치(smart video surveillance system), 유비쿼터스 컴퓨팅 등에 대한 응용 가능성으로 인하여 그 중요성이 날로 강조되고 있다. 또한 사용자의 키높이, 위치, 보행 특성 등의 정보는 사용자가 원 거리에 위치한 경우에도 비교적 정확하게 추출 가능하기 때문에, 이들 정보를 기반으로 사용자의 특징을 분석하고, 이를 사용자의 인식 및 추적에 이용하고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다^{[9][10][11]}. 영상을 기반으로 한 사용자의 3차원 추적은 일반적으로 영상으로부터의 3차원 기하학 정보 취득 기술을 기반으로 구현되며, 따라서 이를 위해서는 2차원 영상과 3차원 공

* 정회원, ** 평생회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 (Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia, and Film, Chung-Ang University)

※ 이 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

접수일자:2007년7월24일, 수정완료일:2008년4월29일

간 사이의 사영 관계를 이용한 3차원 좌표값의 정확한 계산 과정이 필수적이다. 하지만 사영카메라(projective camera) 모델에 의해서 정의되는 사영관계에서는 영상의 2차원 좌표계 상의 한 점이 3차원 공간으로 역사영(back-projection) 될 때 이에 대한 스케일 값이 정의되지 않는 특성이 있다. 따라서 일반적인 단일 영상 기반의 3차원 정보 복원 기법은 영상 내에 존재하는 환경 구조물들의 수직-수평 관계, 또는 소실점 및 소실선 등과 같은 기하학적인 단서들을 병용함으로써 구현된다. 이와 같은 방법들은 영상으로부터 취득한 수평, 수직 성분을 이용하여 영상 내의 소실점 및 소실선을 추정하고, 이들을 무한대 상의 원래의 위치로 복원 시키는 변환을 계산한 다음 이를 기반으로 기하학 정보의 복원을 수행한다. 일반적으로 이러한 과정을 수행하기 위해서는 영상으로 사영된 3차원 공간에서의 수직, 수평 성분 등에 대한 기하학적 조건이 미리 취득되기 위한 과정이 선행되어야 한다. [1] 및 [2]의 논문에서 영상으로 사영된 소실점 및 소실선을 이용하여 영상 내의 객체의 상대적인 높이를 추정하기 위한 기법이 제안되었다. 이를 위해서 영상 내의 소실점 및 소실선의 좌표를 3차원 공간의 원래의 위치로 복원하기 위한 변환을 계산한 다음 이를 이용하여 3차원 공간의 아핀 구조(affine structure)를 복원한다. 그리고 아핀 공간에서 길이의 상대적인 비(ratio)가 보존되는 특성을 이용하여 대상 객체의 상대적인 높이를 계산한다. 이러한 기법은 별도의 카메라 교정(camera calibration) 과정이 필요하지 않으며, 구현이 비교적 간단하다는 장점을 갖고 있다. 3차원 공간 상에서의 객체 위치는 공간 내의 기준면과 영상 사이의 평면 호모그래피(homography) 관계를 이용하여 계산 가능하다. 하지만 이는 영상과 기준면 사이의 사영관계를 이용하는 방법이며, 따라서 기준면 상에 존재하지 않는 점의 3차원 좌표는 일반적으로 복원이 불가능하다는 문제가 있다^[3~4]. 단일 영상 기반의 3차원 기하학 정보 복원 기법이 갖는 어려움 중의 하나는 영상 내의 잡음의 영향 및 영상 해상도 자체의 한계 등으로 인하여 소실점 및 소실선의 정확한 추정이 어렵다는 것이다. 이들 정보는 2차원 영상과 3차원 공간사이의 변환관계를 결정짓는 매우 중요한 기하학적 단서이며, 소실점 및 소실선 계산시 발생하는 사소한 오차에 의해서 3차원 복원 결과가 매우 심각한 영향을 받을 수 있다. 영상으로부터 3차원 공간상의 기하학 정보를 복원하기 위한 보다 일반적인 방법은 다수의 카메라를 이용하는 것이다^[12~16]. 다중 카메라 기반의 3차원 정보

취득 기법들은 기본적으로 3차원 공간 내의 한 점과 다수의 2차원 영상으로 사영된 2차원 좌표값 사이의 대응 관계를 이용하여 구현된다. 3차원 객체 추적에 다수의 카메라를 이용할 경우 정교한 3차원 정보의 취득이 가능하고, 보다 넓은 범위의 공간을 영상으로 취득할 수 있는 장점이 있다. 또한 복수의 영상으로부터 상대적으로 많은 정보를 추출하여 이용할 수 있기 때문에 가려짐 영역의 처리 등과 같은 문제의 해결에 매우 유리하다. 하지만 다중 카메라 기반의 기법은 다수의 영상 간의 대응 관계 계산, 3차원 공간에서의 대응점 계산시 발생하는 모호성, 균일하지 못한 영상 품질 및 특성 등으로 인하여 매우 난해한 문제를 발생시킬 수 있으며, 복수의 카메라를 모두 정확히 교정시켜야 하는 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 단일 카메라를 이용한 이동 객체의 위치 및 높이 정보 계산을 위한 기법을 제안한다. 제안된 기법은 3차원 공간 내에 위치한 보행자의 위치 및 키높이의 추정을 목적으로 한다. 이를 위해서 월드 좌표계(world coordinate system) 내의 기준면과 접촉한 상태에서 이동 중인 객체를 대상으로 하며, 대상 객체는 기준면과 항상 수직을 이루고 있다고 가정한다. 그리고 객체의 위치 및 높이 계산을 위해서 취득된 영상으로부터 대상 객체의 영상을 분리한 다음, 객체의 영상을 3차원 공간 내의 기준 좌표계로 직접 역사영 시킴으로써 객체의 위치 및 높이 값을 계산한다. 제안된 방법은 3차원 공간 내에서의 객체의 높이 및 위치의 동시 추정이 가능하며, 단일 카메라만을 이용하여 3차원 객체 추적에 필요한 정보를 추출하기 때문에 다수의 카메라를 이용할 경우 발생할 수 있는 어려움을 배제할 수 있는 장점이 있다. 또한 일반적으로 널리 사용되는 단일 카메라 기반의 감시, 통제, 보안 시스템 등에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안된 기하학 정보 추정 기법에 대해서 설명한다. 그리고 III장에서 제안된 기법에 대한 실험 결과를 보이고, IV장에서 결론 및 향후 연구 계획을 논한다.

II. 제안된 기법의 개요

본 논문에서 제안하는 기법에 대한 간략한 개념도를 그림 1에 보인다. 카메라로부터 취득된 실시간 영상으로부터 보행자의 영역을 추출한 다음, 영상 내에서의 보행자의 좌표를 계산한다.

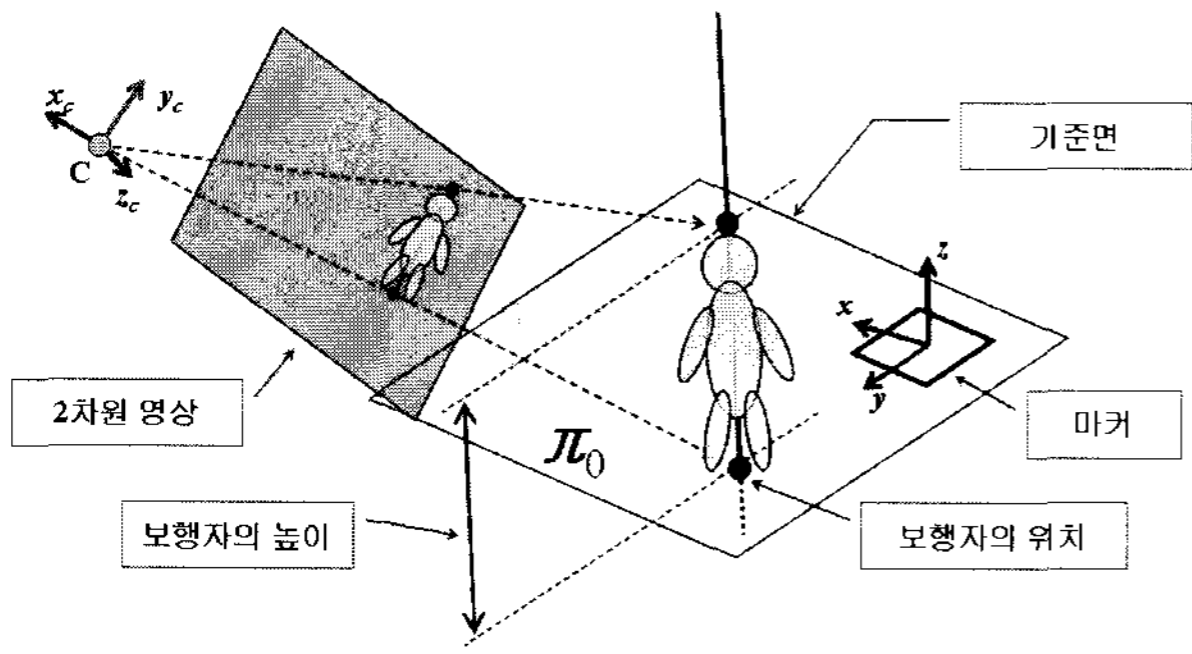


그림 1. 제안된 기법의 개요
Fig. 1. Overview of the proposed technique.

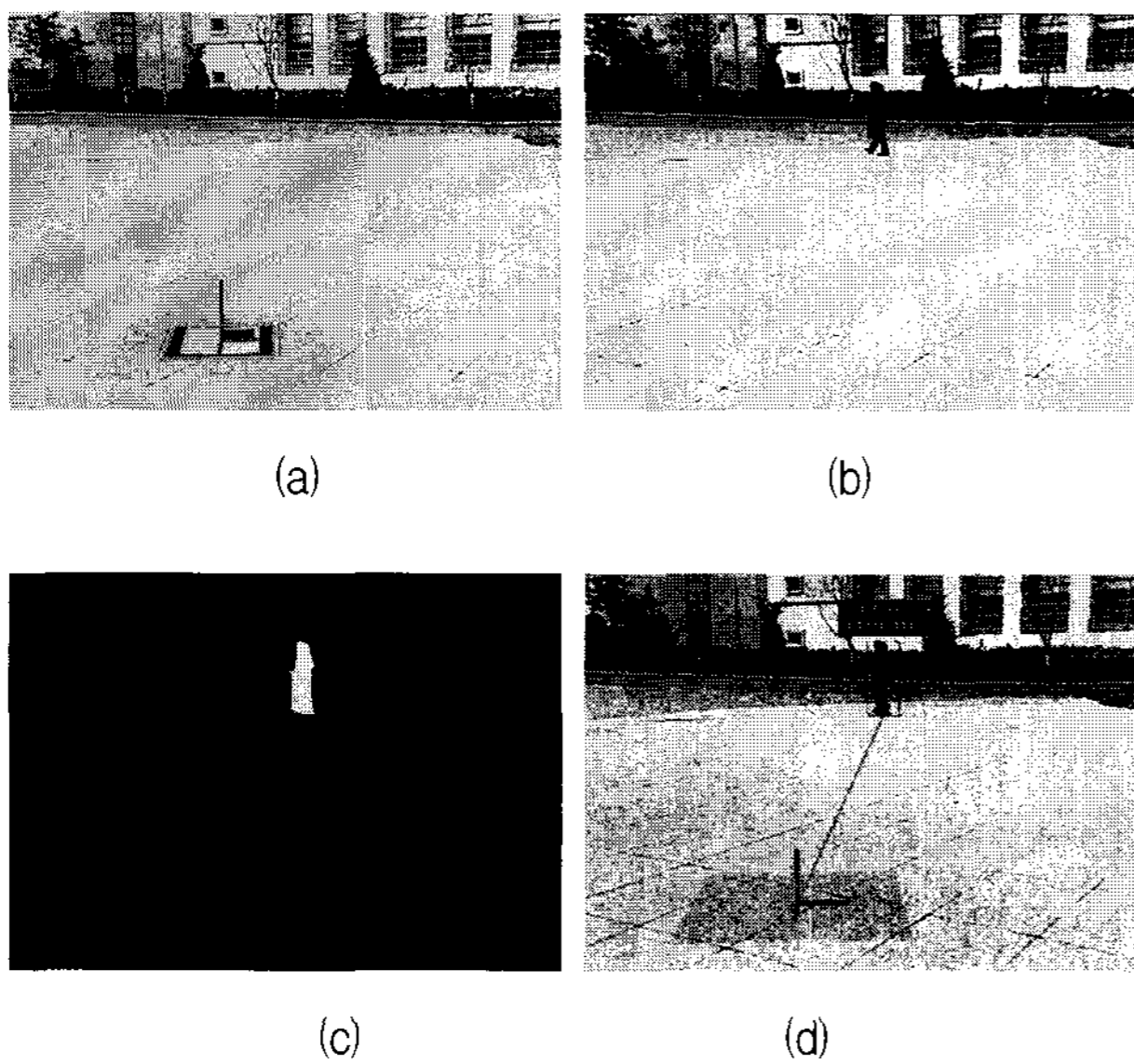


그림 2. 제안된 기법의 수행 과정 (a) 마커를 이용한 카메라의 정보 및 기준좌표계 취득 (b) 실시간 입력 영상 (c) 차분 영상을 이용한 보행자 영역 추출 (d) 보행자의 위치 및 높이 계산 결과
Fig. 2. An example of the procedure (a) Estimation of the projective camera matrix using a marker (b) Real-time input image (c) Extraction of the object (d) Final result

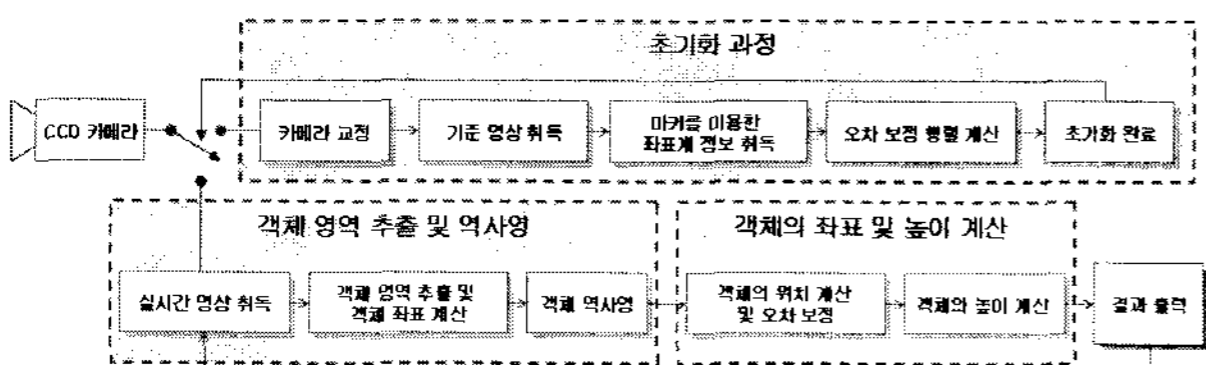


그림 3. 제안된 기법의 블록도
Fig. 3. A block diagram of the proposed technique.

객체 영역의 추출은 기준영상과 실시간 영상 간의 차분 영상을 이용하여 수행된다. 추출된 보행자의 좌표를 3차원 공간 상으로 역사영시킨 다음, 이로부터 보행자의 위치 및 키 높이를 계산한다. 이를 위해서는 3차원 공간상의 기준 좌표계가 필요하며, 제안된 방법에서는

정사각형의 마커(marker)를 이용해서 기준좌표계의 설정 및 카메라 정보의 추정을 수행한다. 제안된 기법의 수행 과정을 그림 2 및 그림 3에 보인다. 제안된 기법은 2차원 영상과 3차원 공간 사이의 사영관계를 기반으로 하며, 따라서 정확한 카메라 정보의 취득을 위한 별도의 카메라 교정 과정이 수행된다. 그리고 차분 영상 계산을 위한 기준 영상을 취득한 다음, 마커를 기준면 상에 위치시키고 이를 이용해서 카메라 정보 및 오차 보정을 위한 행렬을 계산한다. 카메라 정보 및 오차 보정 행렬의 계산이 완료된 후에 마커는 장면 내에서 제거된다. 초기화 과정이 완료되면, 실시간 영상 내에 존재하는 보행자의 위치를 계산한 다음, 2차원 좌표의 역사영 및 오차 보정 과정을 통하여 위치 및 높이를 계산한다.

III. 보행자의 기하학 정보 계산 과정

1. 객체 영상 추출 과정

기하학 정보를 추출하고자 하는 대상 객체 영상의 추출은 기준 영상과의 차분 영상을 이용하여 구현된다. 즉, 대상 객체가 존재하는 영상과 대상 객체가 존재하지 않는 기준 영상과의 차분 영상을 계산한 다음 이를 이진 영상화시키는 과정을 통하여 대상 객체를 추출한다. 이 과정을 다음의 식 (1)에 보인다. 식 (1)에서 I_R 은 기준 영상을, I_G 는 시각 i 에서 취득된 영상을 나타낸다. 그리고 R_{th} 는 배경 영상의 픽셀과 객체 영상을 분리하기 위한 문턱치를 나타낸다.

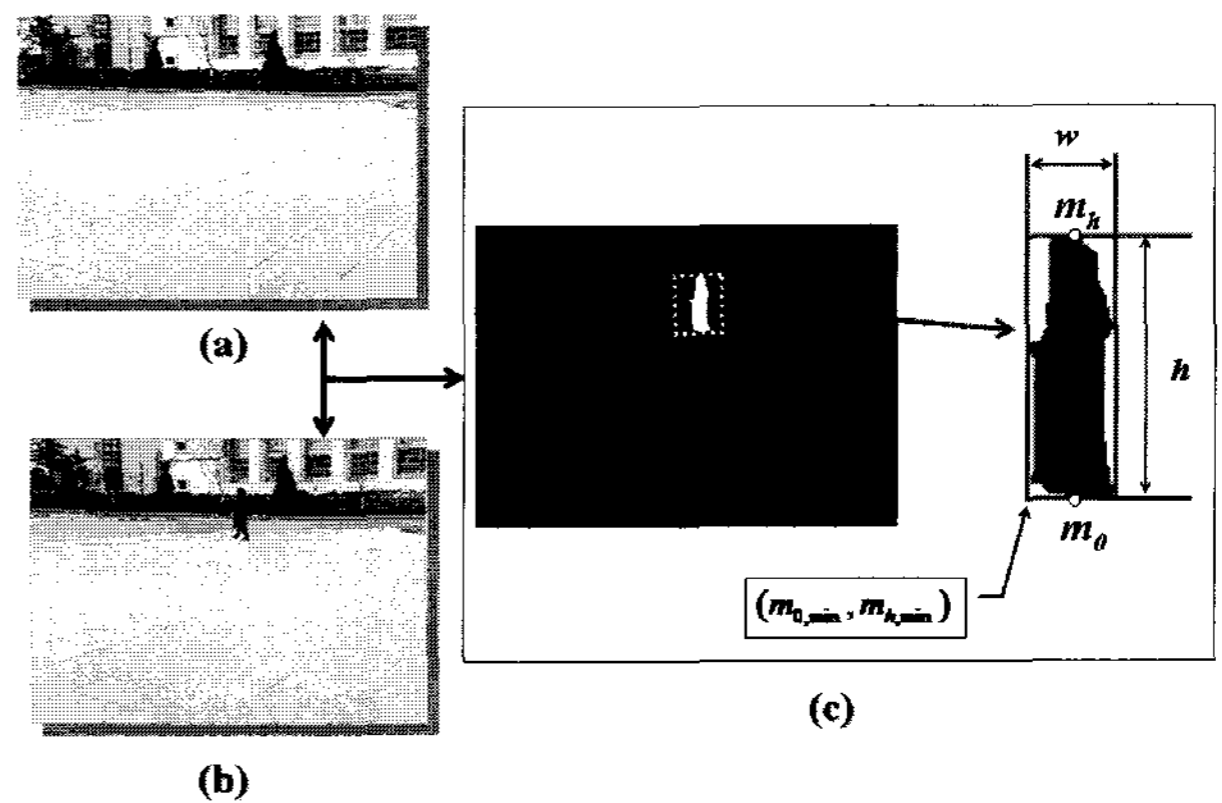


그림 4. 보행자의 좌표값 추출 (a) 기준 영상 (b) 실시간 입력 영상 (c) 취득된 차분 영상 및 객체의 좌표
Fig. 4. Extraction of the area of moving object in the current input image (a) Reference image (b) Current input image (c) Estimation of the object's coordinates in the image.

$$I_D(x,y) = 255, \text{ if } |I_R(x,y) - I_{C_i}(x,y)| > R_{th} \quad (1)$$

$$I_D(x,y) = 0, \text{ Otherwise}$$

식 (1)로부터 추출된 객체의 2진 영상에 대한 모폴로지(morphology) 연산을 수행한 다음 최종 객체 영상을 구한다. 추출된 객체의 영상에서 크기가 일정 값 이하인 영역은 잡음으로 간주하여 제거한다. 그림 4에 2진 객체 영상 영역의 추출 및 객체 좌표 계산 과정을 보인다. 이동 객체의 위치 및 높이의 계산을 위해서 객체 영역의 좌표값은 객체 영역의 가로 폭을 2등분한 좌표를 기준으로 계산하기로 한다. 즉, 객체 영역의 하단 좌표값은 $m_0 = (m_{0,min} + w/2, m_{h,min})$ 이며, 상단 좌표값은 $m_h = (m_{0,min} + w/2, m_{h,min} + h)$ 이다.

2. 2차원 좌표의 역사영

대상 객체의 높이 및 위치는 객체의 2차원 좌표값에 대한 3차원 공간상에서의 역사영(back-projection)을 통하여 계산된다. 3차원 공간내의 한점 $M=(X, Y, Z)$ 와 영상의 한점 $m=(x, y)$ 에 대한 동차좌표계(homogeneous coordinate system) 좌표를 각각 $\tilde{M} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ 과 $\tilde{m} = [x \ y \ 1]^T$ 라고 할 때, 이들 사이의 사영 관계는 3×4 카메라 행렬 \tilde{P} 에 의해서 다음과 같이 정의된다. 본 논문에서 좌표 값의 표기에 사용되는 첨자 ‘ \sim ’는 동차좌표계 좌표를 의미한다.

$$\tilde{m} = \lambda \tilde{P} \tilde{M} = \lambda K [R | t] \tilde{M} = \lambda K [r_1 \ r_2 \ r_3 | t] \tilde{M} \quad (2)$$

식 (2)의 λ 는 사영 행렬 \tilde{P} 에 대한 스케일 변수이며, R 은 카메라의 회전 변위에 의한 3×3 행렬이다. 또한 r_i 는 행렬 R 의 i 번째 열(column)을 나타내며, t 는 카메라의 이동을 의미하는 3×1 이동 벡터 (translation vector)이다. 또한 3×3 행렬 K 는 카메라의 내부 파라미터(intrinsic parameter)를 원소로 갖는 카메라 교정 행렬(camera calibration matrix)을 나타내는 정칙 행렬(non-singular matrix)이며, 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 행렬에서 f_x, f_y 는 영상의 각 좌표 축 방향으로의 스케일 값을 의미하며, s 는 영상에 대한 비틀림 파라미터(skew parameter)이다. 그리고 (x_0, y_0) 는 영상의 주점(principal point)을 나타낸다. 식 (3)의 카메라 행렬

을 구하기 위해서는 일반적으로 별도의 카메라 교정이 필요하다. 본 논문에서는 Zhang이 제안한 카메라 교정 기법을 이용하여 카메라 행렬을 구한다^[6]. Zhang의 카메라 교정 기법은 무한 평면 상의 절대점(absolute points)이 갖는 특징 중 하나인 등거리 변환(isometric transformation)에 대한 불변성(invariance)을 이용하여 영상으로 사영되는 IAC(image of absolute conic) ω 를 계산한 다음, $\omega^{-1} = K K^T$ 의 관계로부터 카메라의 내부 파라미터 행렬을 구한다. 따라서 Zhang의 기법의 구현을 위해서는 서로 다른 방향 및 위치를 갖는 동일 평면에 대한 3장 이상의 영상이 필요하다. 교정된 카메라 행렬 K 와 식 (2)로부터 2차원 영상 평면과 3차원 공간 내에 존재하는 한 평면 π_0 사이의 사영 관계를 계산할 수 있으며, 이는 영상 평면과 π_0 사이의 2차원 호모그래피(homography)로 정의될 수 있다^{[3][4]}. 따라서 π_0 상에 존재하는 서로 다른 4개의 점과 이들에 대한 영상 좌표사이의 호모그래피를 이용하면 카메라 사영 행렬 \tilde{P} 의 계산이 가능하다. π_0 를 3차원 기준 좌표계 상의 XY평면이라고 가정하고, π_0 상의 네 점 $\tilde{X}_1 \sim \tilde{X}_4$ 가 영상의 $\tilde{x}_1 \sim \tilde{x}_4$ 로 사영되었다고 할 때, $\tilde{X}_i = [X_i \ Y_i \ 0 \ 1]^T$ 및 $\tilde{x}_i = [x_i \ y_i \ 1]^T$ 로 구성된 행렬 $\tilde{M}_p = [\tilde{X}_1 \ \tilde{X}_2 \ \tilde{X}_3 \ \tilde{X}_4]$ 와 $\tilde{m}_p = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \tilde{x}_3 \ \tilde{x}_4]$ 사이의 사영 관계는 식 (2)에 의해서 다음과 같다.

$$\tilde{m}_p = K [R | t] \tilde{M}_p = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4] \tilde{M}_p \quad (4)$$

여기서 p_i 는 사영 행렬의 각각의 열 벡터를 나타낸다. 본 논문에서는 \tilde{X}_i 의 좌표를 정사각형 마커의 네 꼭지점을 이용하여 지정한다. 영상으로부터 검출된 마커의 꼭지점 좌표를 식 (4)에 대입하여 정리한 다음, 식 (5)의 관계를 얻는다.

$$K^{-1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} X_i + r_{12} Y_i + t_x \\ r_{21} X_i + r_{22} Y_i + t_y \\ r_{31} X_i + r_{32} Y_i + t_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 영상 내에서의 i 번째 꼭지점 좌표이며, r_{ij} 는 회전 행렬의 i 행 j 열의 원소를 나타낸다. t_x, t_y, t_z 는 이동벡터 t 의 원소이다. 식 (5)와 4개의 꼭지점 좌표를 이용하여 r_{ij} 및 t 의 값을 계산한다. 또한, 회전 행렬의 직교 조건(orthogonal condition)으로부터 R 의 세 번째 열벡터는 $r_3 = r_1 \times r_2$ 이다. 마커의 한 변의 길이가 w_m 이라고 할 때, \tilde{M}_p 를 식 (6)과 같이 정의하면

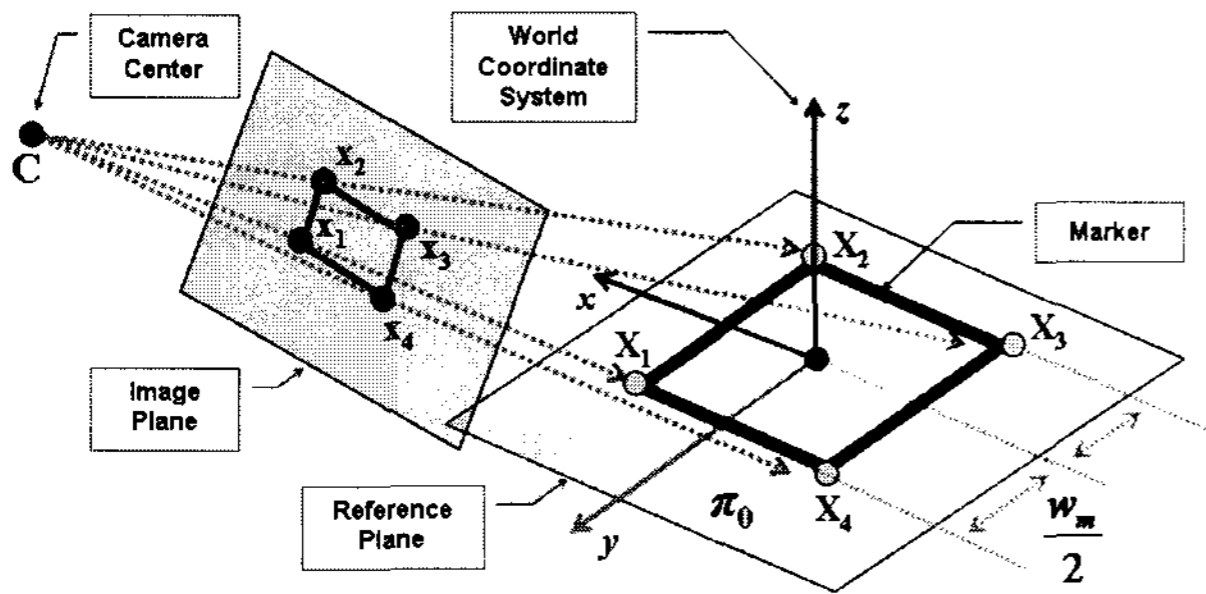


그림 5. 마커와 카메라 영상 사이의 기하학적 관계
Fig. 5. Geometric relationship between the marker and its image.

3차원 기준 좌표계의 원점은 한 변의 길이가 w_m 인 정사각형의 중심, 즉 마커의 중심에 위치한다. 또한 w_m 은 역사영될 3차원 기준 좌표계에 대한 스케일을 결정짓는 역할을 한다.

$$\tilde{M}_p = \begin{bmatrix} w_m/2 & w_m/2 & -w_m/2 & -w_m/2 \\ w_m/2 & -w_m/2 & -w_m/2 & w_m/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

그림 5에 이상의 과정에 대한 기하학적 관계를 보인다. 본 논문에서는 그림 5의 XY 평면 π_0 를 객체의 위치 및 높이 계산을 위한 기준면으로 간주하기로 한다. 위의 식 (5)를 통하여 직접 구한 회전행렬 R은 일반적으로 직교 조건을 만족하지 않는다. 따라서 위의 회전행렬 R을 SVD(singular value decomposition)를 이용하여 $R = U\Sigma V^T$ 로 분해한 다음, 회전 행렬을 최적의 근사값인 $R = UV^T$ 로 근사화시킨다^[5].

영상 내의 임의의 한 점 $m=(x, y)$ 은 3차원 공간 상에서 하나의 직선으로 역사영되며, 그림 6에서 보이는 바와 같이 이 직선은 카메라의 중심 좌표와 영상 내의 한 점 m 을 지난다. 3×3 부분행렬 P를 이용하여 카메라 행렬을 $\tilde{P} = [P \ \tilde{p}]$ 라고 정의하면, 카메라의 중심의 좌표 C는 다음과 같다.

$$C = -P^{-1}\tilde{p}. \quad (7)$$

카메라의 중심과 점 m 을 잇는 직선을 L이라고 할 때, L의 방향은 L의 무한 원점(point at infinity)으로부터 구할 수 있다. 또한 3차원 공간으로 역사영되는 2차원 평면 상의 한 점은 직선을 이루므로, 직선 L에 대한 무한 원점 \tilde{D} 를 다음의 관계를 이용하여 계산한다.

$$\tilde{P}\tilde{D} = \tilde{m}, \quad \tilde{D} = [D^T \ 0]^T, \quad (8)$$

$$D = P^{-1}\tilde{m}, \quad \tilde{m} = [m^T \ 1]^T. \quad (9)$$

식 (7)~식 (9)로부터 점 m 에 대한 역사영 결과는 다음과 같이 계산된다.

$$L = -P^{-1}\tilde{p} + \lambda P^{-1}\tilde{m} = P^{-1}(-\tilde{p} + \lambda\tilde{m}) = C + \lambda D, \quad -\infty < \lambda < \infty. \quad (10)$$

3. 객체의 위치 및 높이 계산

본 논문에서 제안하는 3차원 공간 상의 위치 및 높이 추정 기법은 기준면과 수직을 이루도록 직립한 상태의 사람을 대상으로 한다. 따라서 대상 객체는 기준면과 항상 접촉하고 있으며, 기준면과 수직을 이루고 있다고 가정한다. 이에 대한 개략적인 기하학적 관계를 그림 6에 보인다. 그림 6에서 객체 $\overline{M_0M_h}$ 가 영상의 $\overline{m_0m_h}$ 로 사영되었다고 가정한다. 대상 객체의 높이는 M_0 와 M_h 사이의 거리이며, 객체의 위치는 기준면 상의 M_0 의 값을 계산함으로써 구할 수 있다. M_0 의 좌표 값은 그림 6의 직선 L_1 과 월드좌표계 상의 기준면인 XY 평면 π_0 의 교점이다. 식 (10)으로부터 직선 L_1 과 π_0 의 교점은 다음과 같다.

$$M_0 = -P^{-1}\tilde{p} + \lambda_0 P^{-1}\tilde{m}_0 = C + \lambda_0 P^{-1}\tilde{m}_0. \quad (11)$$

식 (11)의 λ_0 는 L_1 이 π_0 과 교차하는 지점에서의 스케일 값이다. 교점 M_0 가 평면 π_0 상에 항상 위치한다고 가정하면 다음의 관계를 만족시킨다.

$$\tilde{\pi}_0^T \tilde{M}_0 = 0, \quad \tilde{\pi}_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad \tilde{M}_0 = [M_0 \ 1]^T, \quad (12)$$

$$\pi_0^T M_0 = \pi_0^T (C + \lambda_0 P^{-1}\tilde{m}_0). \quad (13)$$

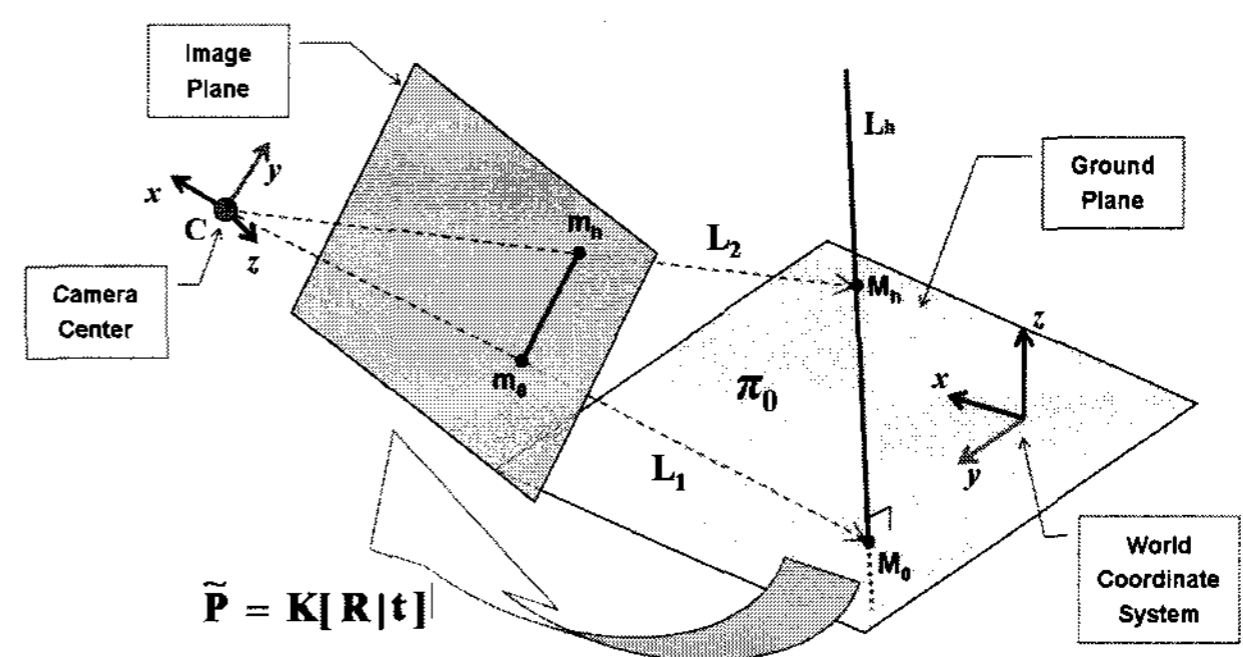


그림 6. 객체의 위치 및 높이 계산을 위한 2차원 좌표의 역사영
Fig. 6. Back-projection of 2D coordinates for the estimation of the position and the height.

식 (12), (13)으로부터 λ_0 는 식 (14)과 같이 계산된다. 계산된 λ_0 와 식 (11)으로부터 L_1 과 π_0 의 교점 M_0 를 구할 수 있다.

$$\lambda_0 = -\frac{\pi_0^T C}{\pi_0^T P^{-1} \tilde{m}_0}. \quad (14)$$

한편 객체의 3차원 공간 상에서의 높이는 그림 5에서 M_h 와 M_0 의 거리이다. M_h 는 기준면 π_0 에 수직인 직선 L_h 와 L_2 의 교점이며, L_2 와 L_h 는 각각 다음의 식 (15) 및 식 (16)과 같다.

$$L_2 = -P^{-1} \tilde{p} + \lambda P^{-1} \tilde{m}_h = P^{-1}(-\tilde{p} + \lambda \tilde{m}_h) = C + \lambda D_h, \quad -\infty < \lambda < \infty, \quad (15)$$

$$\tilde{L}_h = \tilde{M}_0 + \mu \tilde{D}_v, \quad \tilde{D}_v = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad -\infty < \mu < \infty \quad (16)$$

식 (15), 식 (16)으로부터 L_h 와 L_2 의 교점인 M_h 를 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$L_h = L_2 = M_h, \quad (17)$$

$$M_0 + \mu D_v = C + \lambda P^{-1} \tilde{m}_h. \quad (18)$$

식 (18)을 식 (19)와 같이 정리하여 λ 와 μ 의 값을 구한다. 그리고 이를 식 (15), 식 (16)에 대입하여 객체의 높이를 계산한다.

$$\begin{bmatrix} m_1 - c_1 \\ m_2 - c_2 \\ m_3 - c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{h1} & -d_{v1} \\ d_{h2} & -d_{v2} \\ d_{h3} & -d_{v3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix}. \quad (19)$$

식 (19)의 m_i , c_i , d_{hi} , d_{vi} 는 각각 M_0 , C , D_h , D_v 의 i 번째 행의 원소이다.

4. 부정확한 카메라 교정에 의한 기하학적인 오차 보정 과정

카메라 교정이 정확하게 수행되지 않을 경우 영상의 역사영 과정에서 심각한 재사영 오차(reprojection error)가 발생한다. 정확하지 않은 카메라 행렬로 인하여 카메라의 위치 및 방향의 추정에 오차가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 기준좌표계에 대한 카메라의 상대적인 위치 및 방향이 정확하지 않을 수 있다. 이와 같은 오차가 발생할 경우, 기하학적인 관계의 왜곡으로 인하여 객체의 위치 및 높이의 계산 결과가 심각한 영향을 받는다. 카메라가 고정되어있다고 가정할때, 정확하지 않은 카메라 교정으로 인하여 발생할 수 있는 문제의

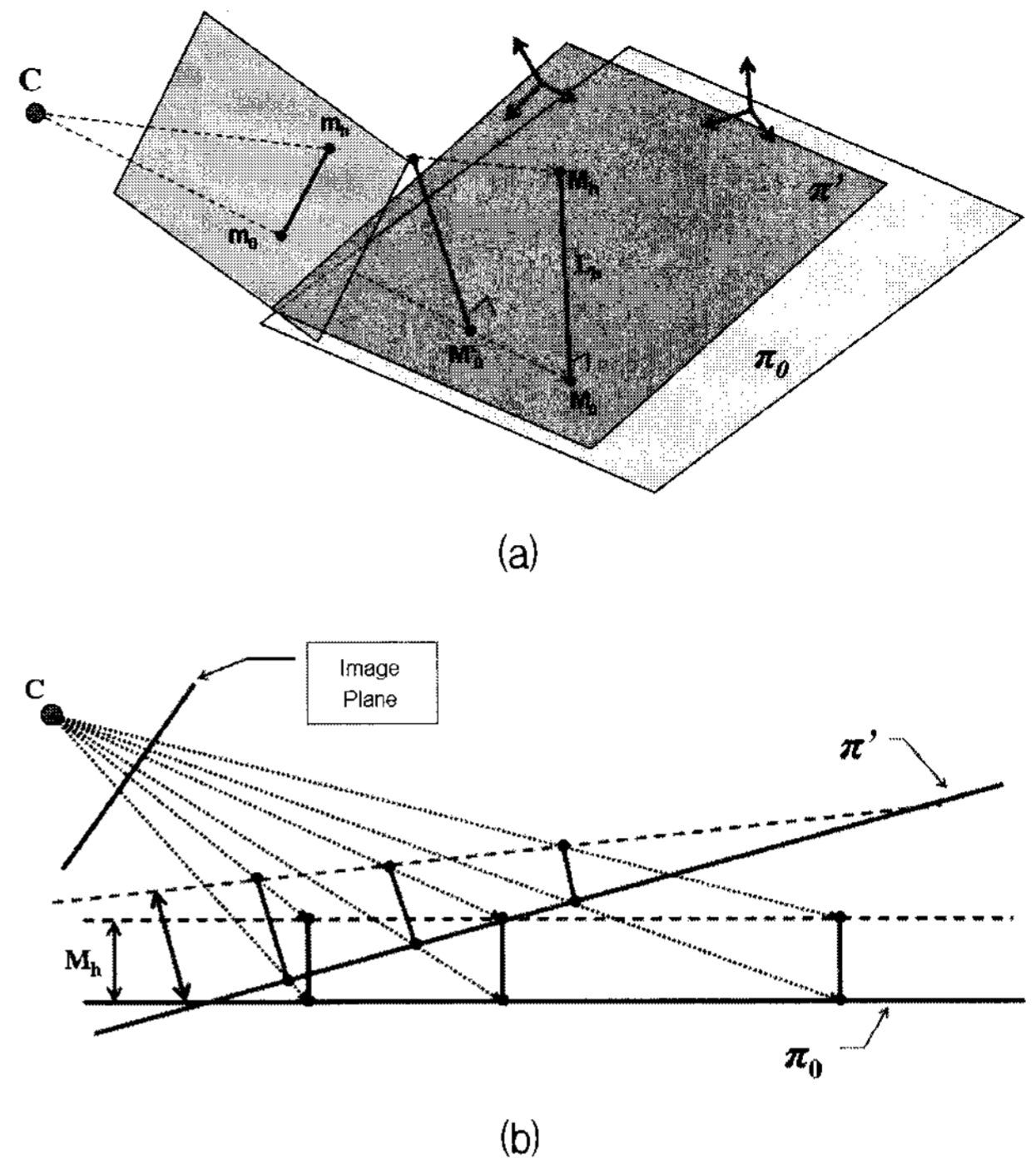


그림 7. 부정확한 카메라 교정으로 인한 재사영 오차 (a)기준면에 대한 카메라의 상대적인 위치 검출 오차 (b) (a)의 문제로 인한 높이 및 위치 검출 오류의 예

Fig. 7. Back-projection errors due to inaccurate camera calibration (a) Geometric relationship (b) Side view of (a).

예를 그림 7에 보인다. 그림 7(a)에서 π_0 는 카메라에 대한 정확한 기준면이며, π' 는 카메라 교정 오차로 인하여 잘못 검출된 기준면, 즉 기준면과 카메라 사이의 상대적인 위치 검출에 오차가 발생한 경우를 보인다. 그림 7(b)는 그림 7(a)에 대한 측면도의 예이며, 동일한 영상이 서로 다른 기준면에 역사영되었을 때 객체의 위치 및 높이의 계산에 심각한 오차가 발생할 수 있음을 보여준다. 객체의 실제 높이는 객체의 위치에 관계없이 항상 일정한 값이 되어야 한다. 하지만 그림 7(b)와 같이 기하학적 관계가 왜곡된 경우, 객체의 위치가 카메라로부터 멀어질수록 계산된 높이 값이 점차 감소하는 문제가 발생하며, 객체의 위치 또한 정확하지 않은 결과를 보인다. 3차원 공간 상에서 두 평면 간의 사영 관계는 2차원 호모그래피에 의해서 정의되며, 따라서 이상적인 기준면과 검출된 기준면 간의 사영관계 또한 평면 호모그래피에 의해서 계산될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 카메라 교정 오차로 인하여 발생하는 문제를 이상적인 기준면과 검출된 기준면 간의 2차원 호모그래피를 이용해서 보정한다. 이에 대한 예를 그림 8(a)에 보인다.

영상의 2차원 좌표계에서 취득한 마커의 꼭지점 좌표 값 $x_1 \sim x_4$ 가 3차원 공간 상으로 역사영 될때 오차가 존재하지 않는 이상적인 경우를 가정하면 기준면과의 교점은 그림의 $X_1 \sim X_4$ 가 되어야 한다. 하지만 위에서 설명한 카메라 교정 오차로 인하여 계산된 교점은 검출된 기준면 π' 상의 네 점, 즉 $X'_1 \sim X'_4$ 로 검출된다. $X'_1 \sim X'_4$ 의 좌표는 카메라의 중심 및 $x_1 \sim x_4$ 를 지나는 직선과 π' 의 교점이다. $X_1 \sim X_4$ 는 마커를 이용하여 지정되는 이상적인 꼭지점 좌표값이며, 한 변의 길이가 w_m 인 마커의 4개의 꼭지점의 좌표로 구성된 행렬 $\tilde{N}_p = [\tilde{X}_1 \tilde{X}_2 \tilde{X}_3 \tilde{X}_4]$ 를 식 (20)과 같이 정의하면 계산된 마커의 꼭지점 좌표와 이상적인 좌표 값 사이의 호모그래피를 식 (21)의 관계로부터 계산할 수 있다.

$$\tilde{N}_p = \begin{bmatrix} w_m/2 & w_m/2 & -w_m/2 & -w_m/2 \\ w_m/2 & -w_m/2 & -w_m/2 & w_m/2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\tilde{N}_p = H_p \tilde{N}'_p. \quad (21)$$

식 (21)에서 \tilde{N}'_p 는 $\tilde{X}'_1 \sim \tilde{X}'_4$ 로 구성된 행렬이며, H_p 는 두 평면 사이의 평면 호모그래피를 나타낸다. 따라서 π' 상의 객체의 위치를 $\tilde{M}'_0 = [X_M \ Y_M \ 1]$ 라고 하

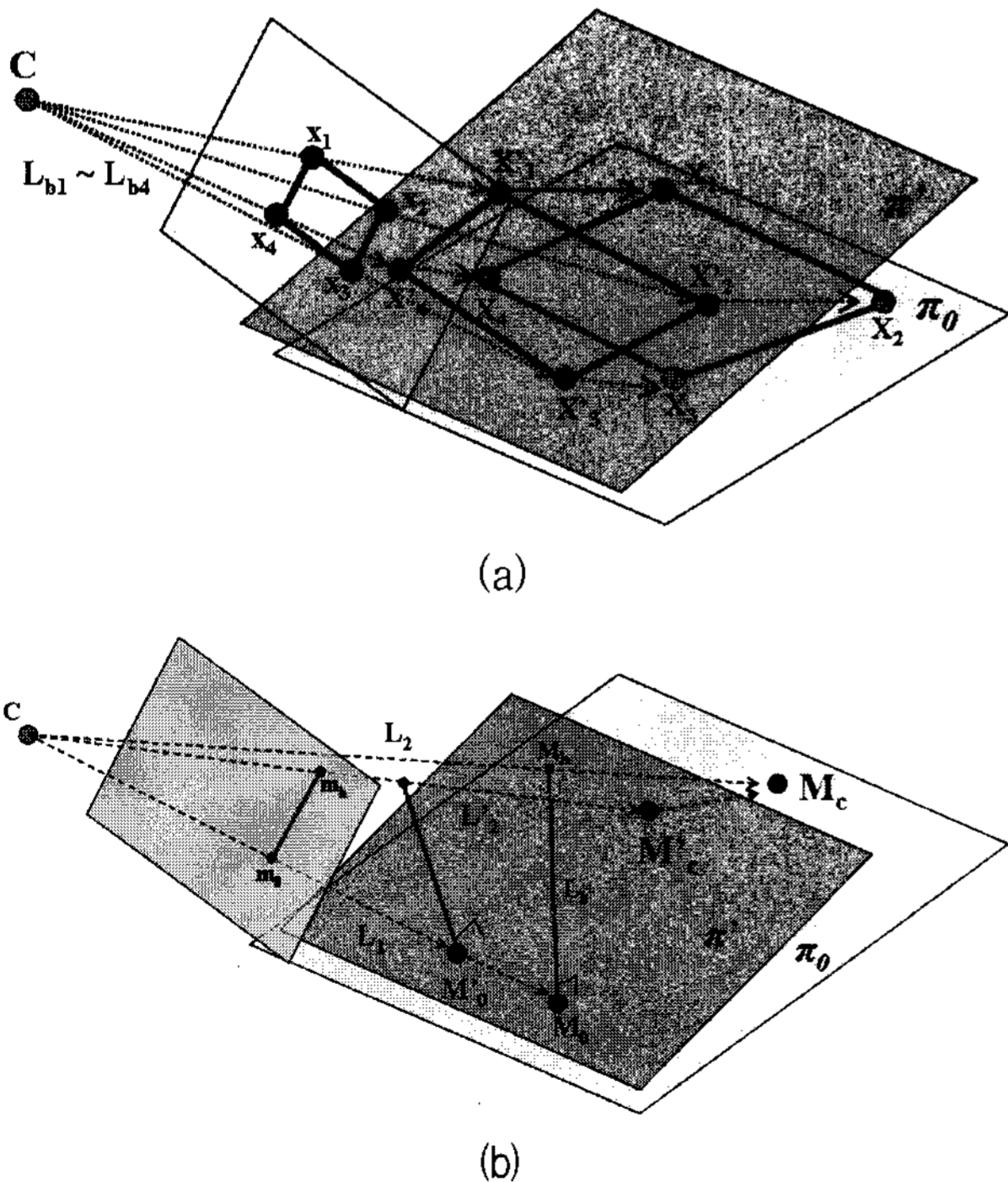


그림 8. 마커의 꼭지점 좌표를 이용한 역사영 좌표의 보정 과정
Fig. 8. Correction of back-projected coordinates using vertices of the marker.

면 H_p 에 의해서 교정되는 객체의 위치는 다음과 같다.

$$\tilde{M}_0 = H_p \tilde{M}'_0. \quad (22)$$

한편, 2.3절에서 설명한 바와 같이 객체의 높이는 기준면에 수직인 직선 L_h 와 직선 L_2 의 교점인 M_h 로부터 계산된다. 하지만 식 (21)의 H_p 는 π' 와 π_0 사이의 사영 관계를 정의하는 평면 호모그래피이며, 따라서 객체의 높이는 H_p 를 이용하여 직접 보정할 수 없다. 따라서 M_h 의 좌표는 다음의 과정을 거쳐서 보정되며, 이에 대한 그림을 그림 8(b)에 보인다.

i) L'_2 와 π' 의 교점 M'_c 를 다음과 같이 구한다.

$$M'_c = P^{-1}(-\tilde{p} + \lambda_c \tilde{m}_h), \lambda_c = -\frac{\pi_0^T C}{\pi_0^T P^{-1} \tilde{m}_h}. \quad (23)$$

ii) H_p 를 이용하여 M'_c 를 π_0 상의 M_c 로 변환한다.

$$\tilde{M}_c = H_p \tilde{M}'_c, \tilde{M}_c = [M_c \ 1]^T. \quad (24)$$

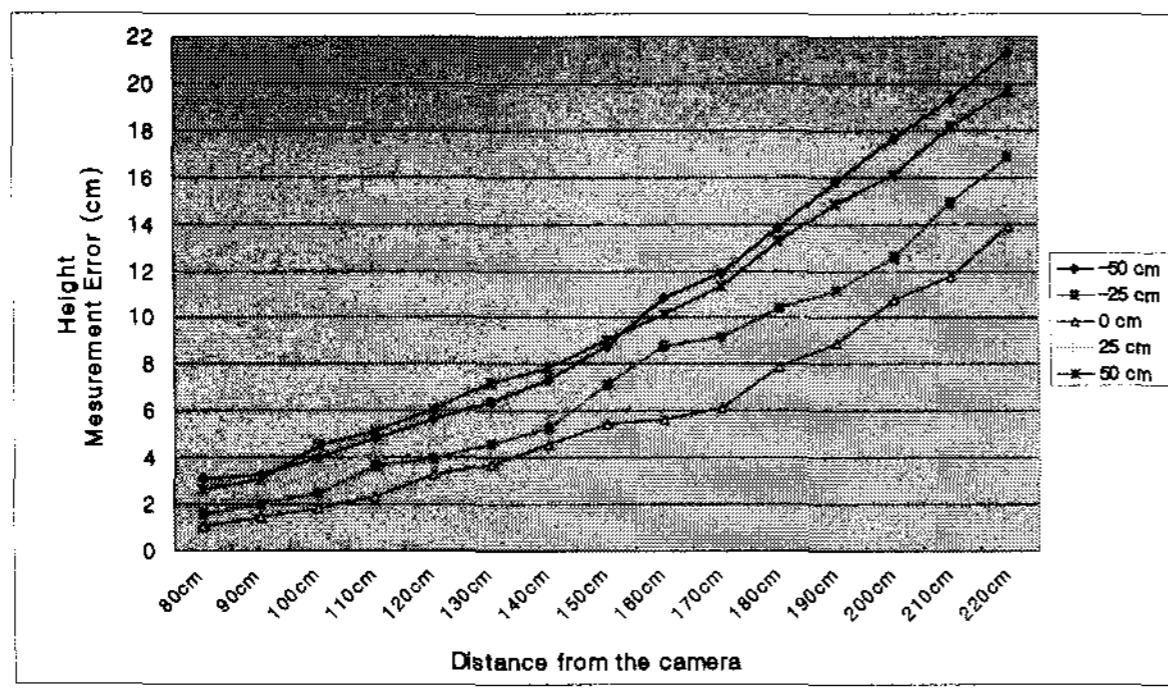
iii) 카메라의 중심 C 및 M_c 를 지나는 직선 L_2 와 객체의 위치인 M_0 를 지나고 기준면에 수직인 직선 L_h 와의 교점을 식 (17)~식 (19)를 이용하여 구하고, 이로부터 M_h 의 좌표를 계산한다. 그리고 $h = \|M_h - M_0\|$ 의 관계로부터 객체의 높이를 구한다.

IV. 실험 결과

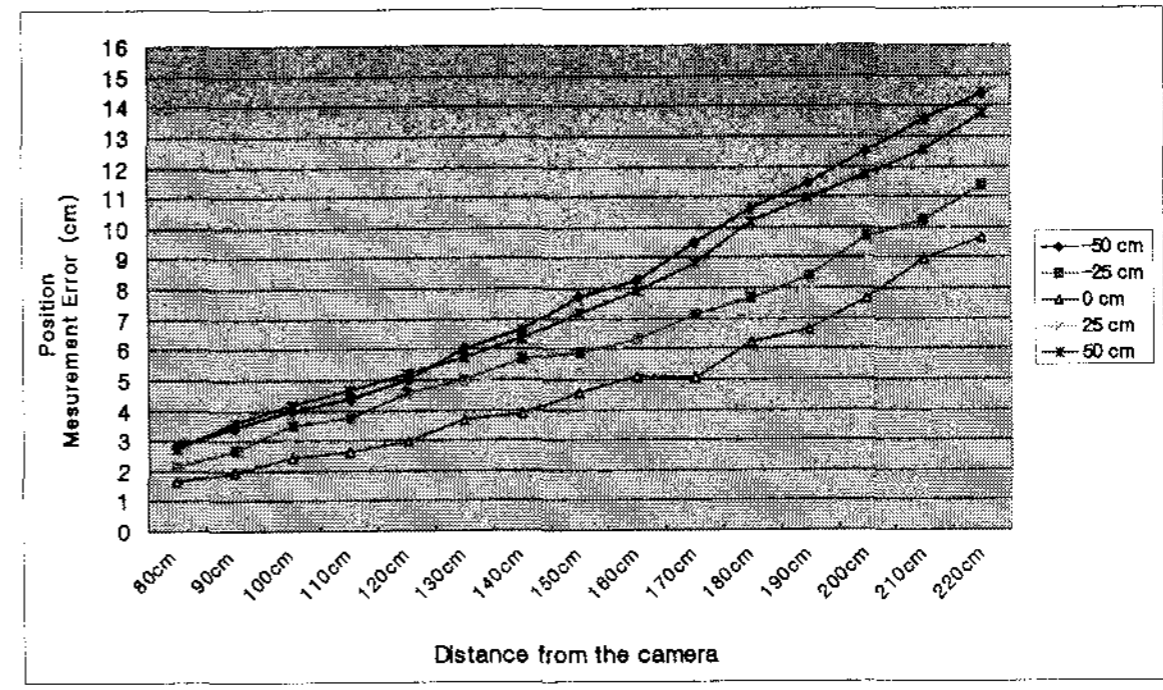
제안된 방법의 성능을 평가하기 위한 실험을 수행한다. 이를 위해서 실험실 내의 제한된 환경 하에서 오차 보정 과정을 적용한 경우와 오차 보정 과정이 적용되지 않은 경우 각각에 대한 실험 결과를 비교 및 분석한다. 그리고 일반적인 환경에서 실제 보행자를 대상으로 한 실험을 통하여 제안된 기법의 성능을 평가한다. 모든 실험은 720 X 480의 해상도 및 초당 30프레임의 영상을 출력하는 CCD 카메라를 이용하여 수행되었으며, 카메라의 위치 및 방향은 임의의 위치에 고정되어있다고 가정한다.

1. 제한된 조건에 대한 실험 결과

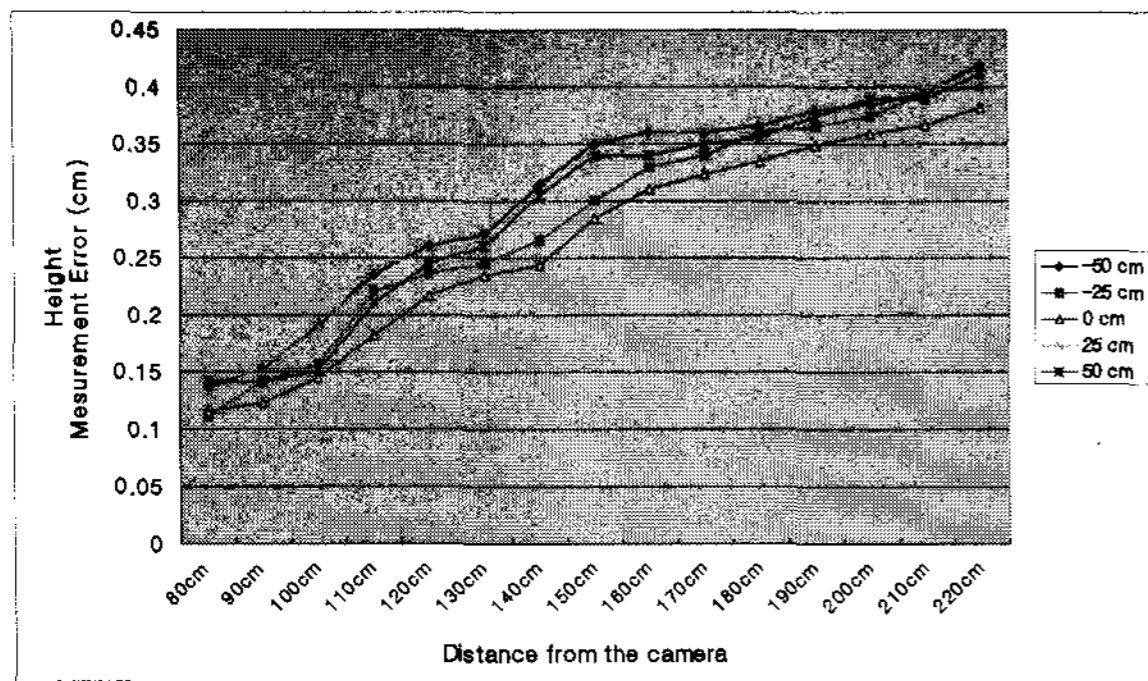
조명 및 배경 정보에 대한 조건이 제한적인 실험실 환경 하에서, 객체의 위치 변화에 대한 제안된 방법의 정확도 분석 및 오차 보정 과정의 적용 여부에 대한 결



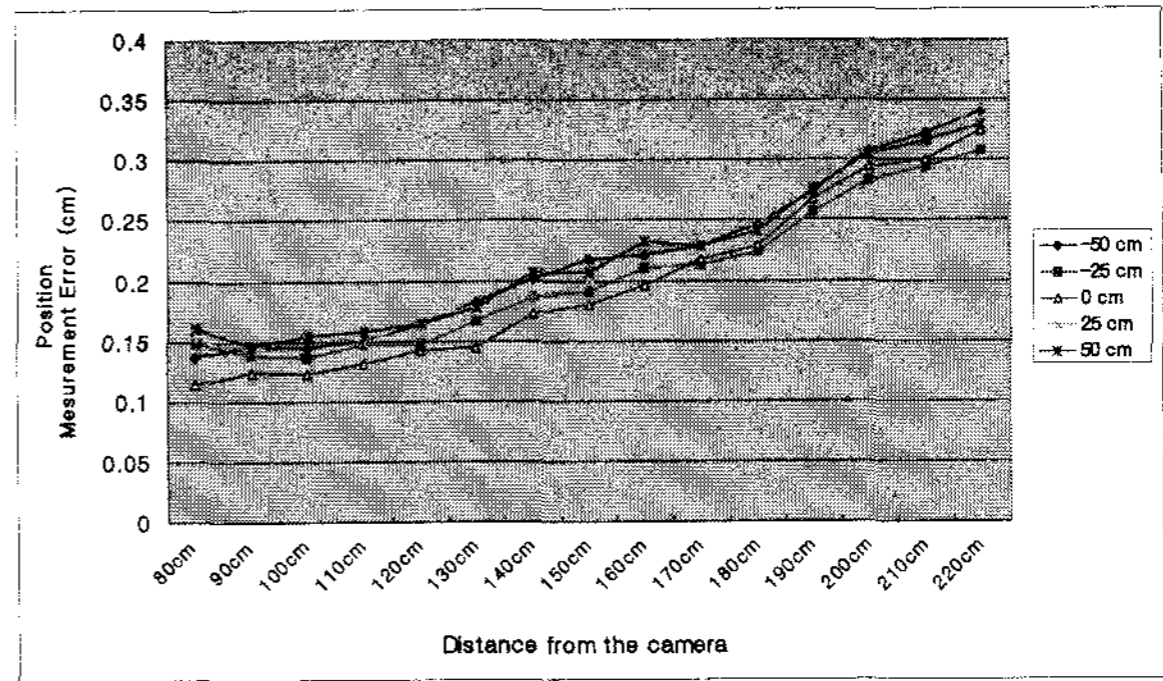
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9. 제한된 환경에서의 위치 및 높이 계산 오차

(a), (b) 높이 및 위치 계산 오차 (오차 보정 이전) (c), (d) 오차 보정 이후의 계산 오차

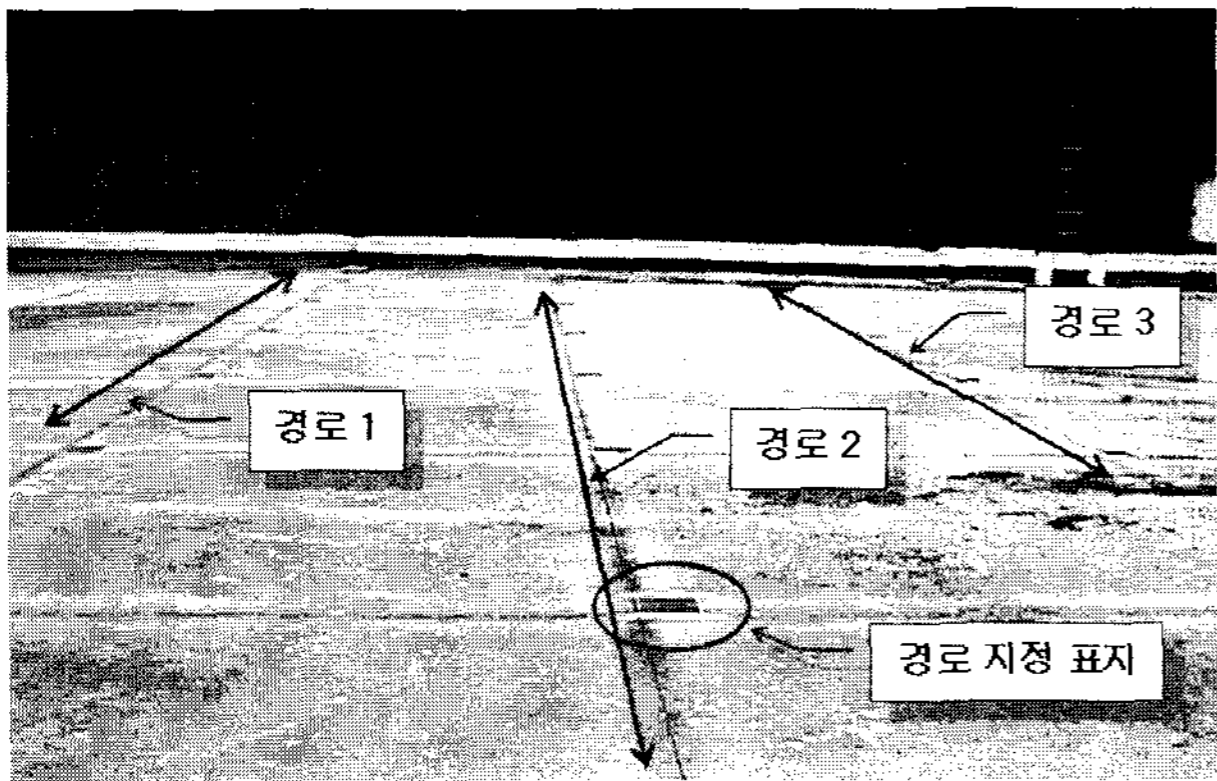
Fig. 9 Estimation Errors of the experiments on the table (a), (b) Estimation errors of heights and positions without the coordinate correction (c), (d) Estimation errors after the correction process.

과 비교를 위한 실험을 수행한다. 이를 위해서 본 논문에서는 30cm의 길이를 갖는 막대를 카메라의 전방에 위치시킨 다음, 카메라의 전후 방향으로 10cm, 좌우의 수평 방향으로 25cm씩 위치를 변화시키면서 실제의 위치 및 높이와 측정된 값 사이의 오차를 계산하였다. 또한 기준좌표계의 설정을 위해서 한 변의 길이가 $w_m = 30\text{cm}$ 인 정사각형의 마커가 사용되었다. 이에 대한 결과를 그림 9에 보인다. 그래프의 x축은 카메라와 객체 사이의 전후 방향의 거리를 의미하며, 각각의 곡선은 카메라와 객체 사이의 좌우 방향으로의 거리 변화에 대한 실제 높이 및 위치와의 오차의 절대값을 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 앞서 설명된 오차 보정 과정이 수행되지 않은 결과이며, 그림 9(c)와 그림 9(d)는 마커의 꼭지점 좌표를 이용해서 위치 및 높이 검출 오차 보정을 수행한 결과이다. 오차 보정이 수행되지 않은 경우, 매우 큰 값의 오차가 발생하지만, 오차 보정 과정을 통해서 오차 발생이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 객체와 카메라 사이의 거리가 증가할수록 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 카메라로부터의 좌우 방향의 거리 또한 계산 결과에 영향을 미친다는

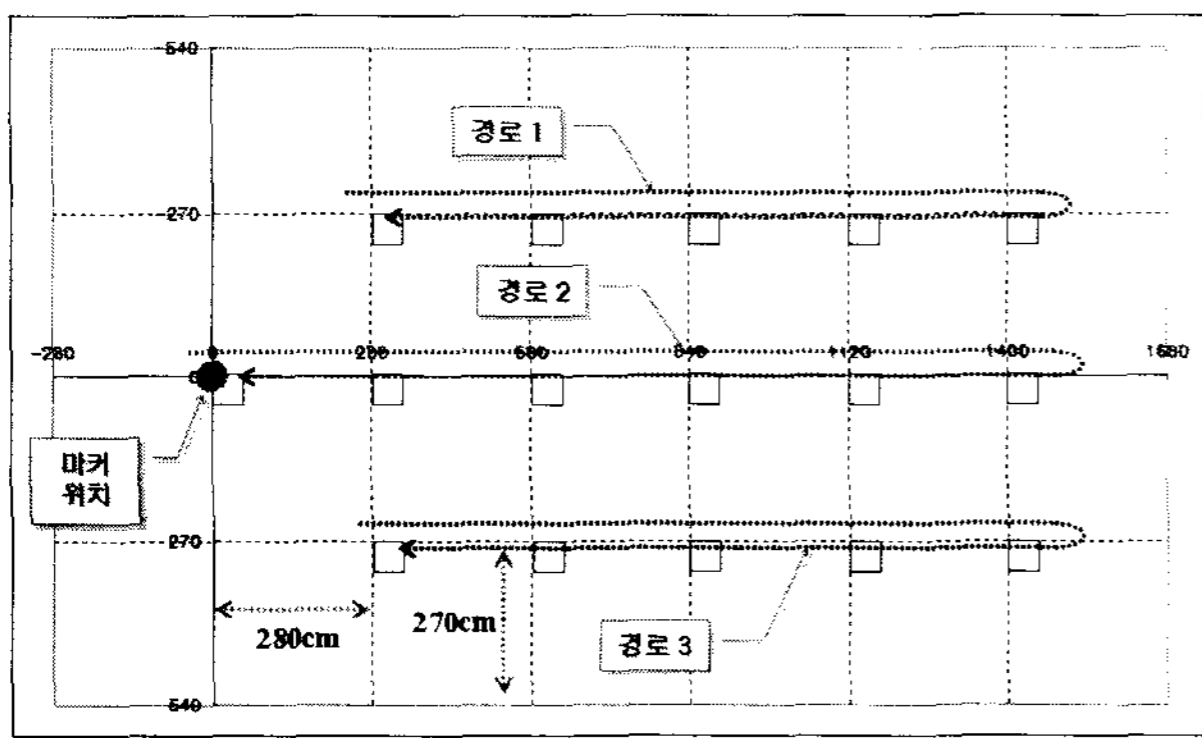
것을 확인 할 수 있다. 오차 발생의 원인은 영상 해상도 자체의 한계 및 영상 내에 존재하는 잡음에 의한 역사영 좌표 계산 과정의 오차 성분으로 인한 것으로 추정된다. 하지만 그림 9(c) 및 그림 9(d)에서 측정된 오차의 범위는 카메라와 객체 사이의 거리 및 객체의 높이를 고려할 때 상대적으로 매우 작은 값이라고 간주될 수 있다. 따라서 제안된 방법은 카메라와 객체 사이의 거리 및 객체의 위치변화에 다소의 영향을 받기는 하지만, 결과에 심각한 오차를 발생시키지 않는 것을 확인할 수 있다.

2. 실제 환경에서 제안된 방법의 성능 평가

실제 환경에서 이동 중인 보행자의 위치 변화에 대한 제안된 기법의 정확도 및 오차 분석을 위한 실험을 수행한다. 실험을 위해서 그림 10과 같이 기준면 상에 보행자의 이동 경로를 설정한 다음, 이를 따라 이동하는 보행자의 키 높이 및 이동 궤적을 산출하고 이로부터 제안된 기법의 정확도를 평가한다. 보행자의 이동 경로는 280cm X 270cm의 크기를 갖는 직사각형의 구역마다 경로 지정을 위한 표식자를 부착하여 지정하며, 보



(a)

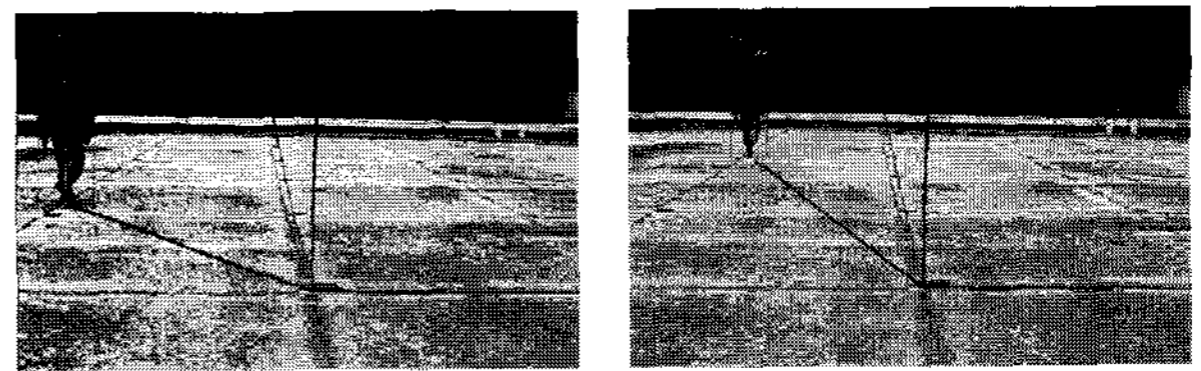


(b)

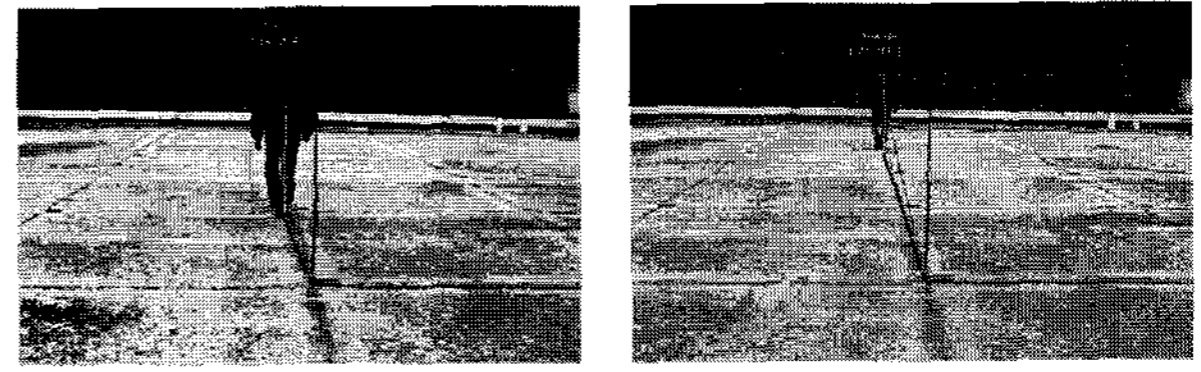
그림 10. 실험 환경 (a) 실험 환경 및 보행자의 이동 경로 (b) (a)의 상면도

Fig. 10. Experimental setting (a) Outdoor scene for the experiment and the tracks designated by landmarks (b) Bird's eye view of (a)

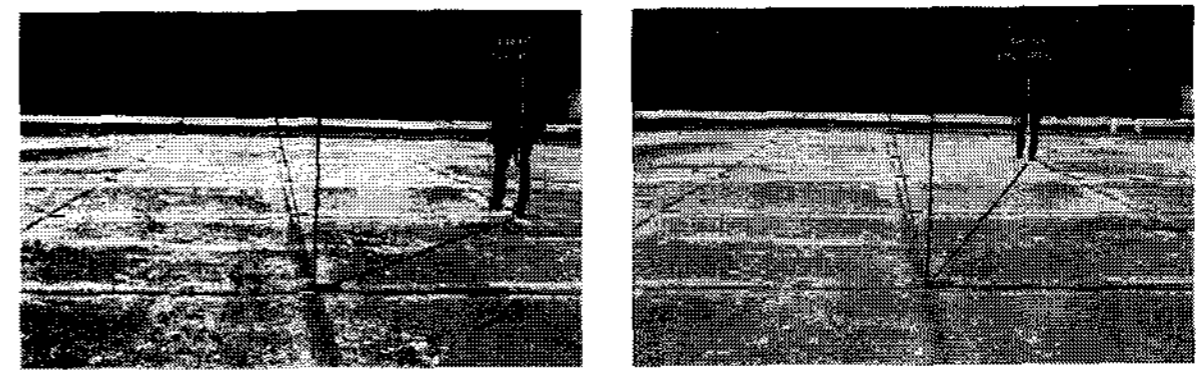
행자는 지정된 경로를 따라 왕복으로 이동한다. 실험을 위해서 한 변의 길이가 $w_m = 60\text{cm}$ 인 정사각형의 마커를 이용하였으며 영상 내에 존재하는 보행자는 마커가 위치한 기준면과 항상 동일 평면상에 위치한다고 가정한다. 그림 11(a) ~ 그림 11(c)는 이에 대한 실험 과정에 대한 그림이며, 정해진 경로를 따라서 이동 중인 보행자의 위치 및 키높이 계산 결과, 마커로부터 계산된 기준좌표계, 보행자의 위치를 가리키는 벡터를 보여준다. 실험을 통하여 취득된 높이 계산 결과를 그림 11(d)의 그래프 및 표 1에 보인다. 일반적으로 보행자의 높이는 보폭과 보행 형태 등에 의한 영향으로 인하여 주기적인 형태로 변화하는 특성을 갖게 되며, 보행자의 보폭의 길이가 최대일 때 최소값, 보폭의 길이가 최소일 때 최대의 값을 갖는다. 따라서 보행 중 계산된 높이의 평균값을 보행자의 높이로 간주한다. 실험에 참여한 보행자의 실제 키높이는 185cm이고, 계산된 높이의 평균 값은 약 186cm이며, 2.15cm ~ 2.56cm의 표준편차를 갖는 것을 확인 할 수 있다. 그림 11(e)는 계산된 결



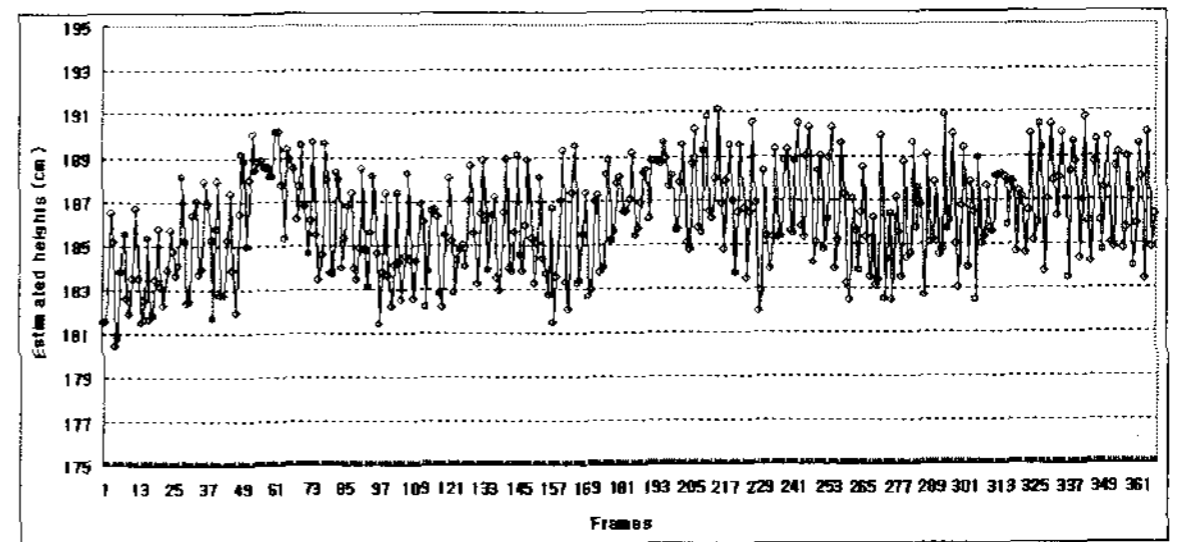
(a)



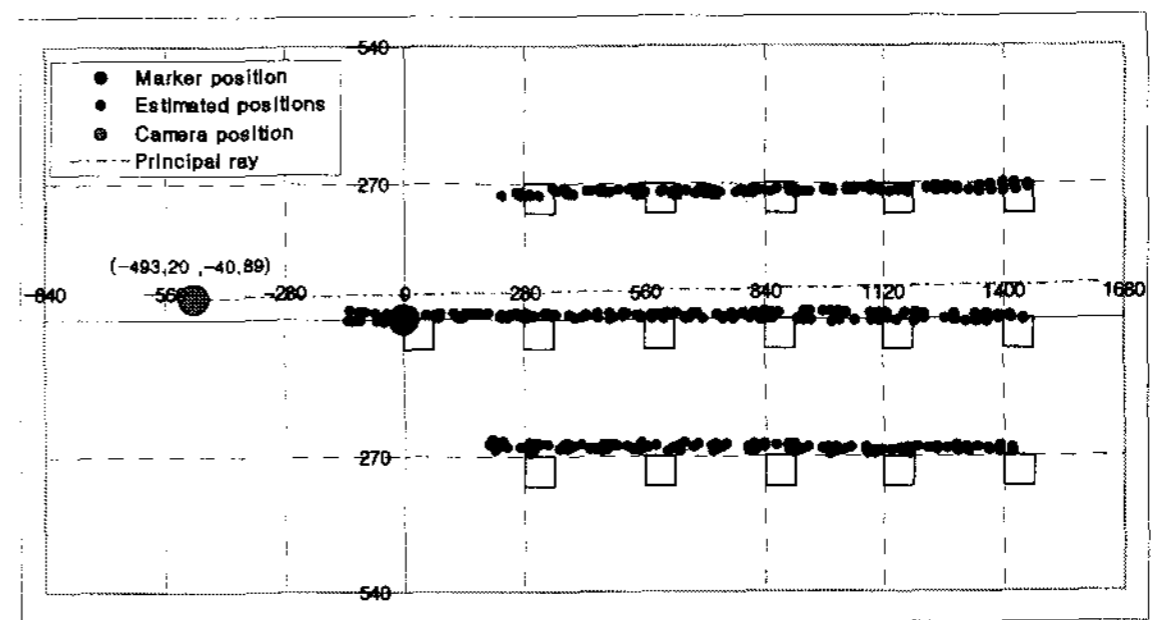
(b)



(c)



(d)



(e)

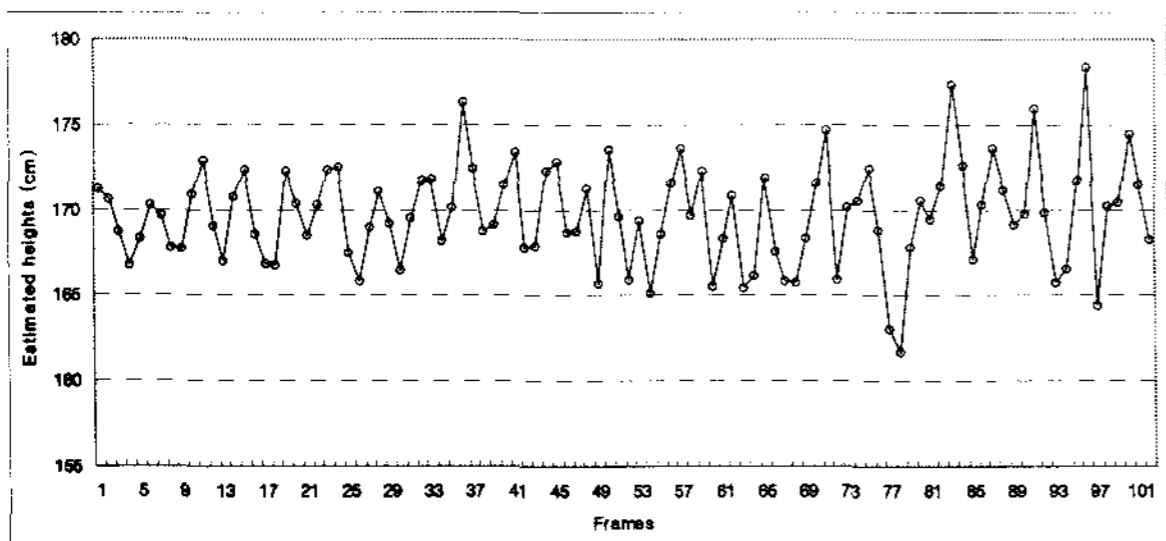
그림 11. 실험 1 (a) 경로 1 (b) 경로 2 (c) 경로 3 (d) 높이 계산 결과 (e) 위치 계산 결과 및 상면도

Fig. 11. Experimental results 1 (a), (b), (c) The participant moving along each of track 1, track 2, and track 3 (d) Estimated heights (e) Bird's eye view which illustrates estimated positions

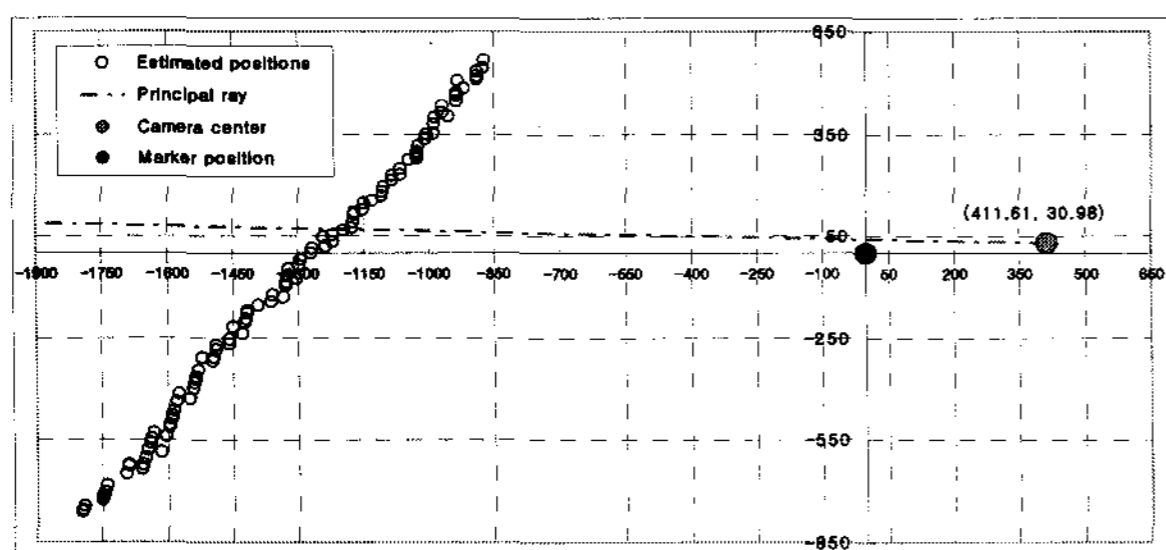
과로부터 구성된 상면도(bird's eye view)이고, 보행자의 이동 경로, 카메라의 위치 및 주선(principal ray)을 보여준다. 정확한 오차 분석을 위하여, 계산된 보행자의 이동 경로를 원점을 중심으로 -1° 만큼 회전 이동시켜서 마커로부터 계산된 기준 좌표계에 정합시켰으며, 카



(a)



(b)

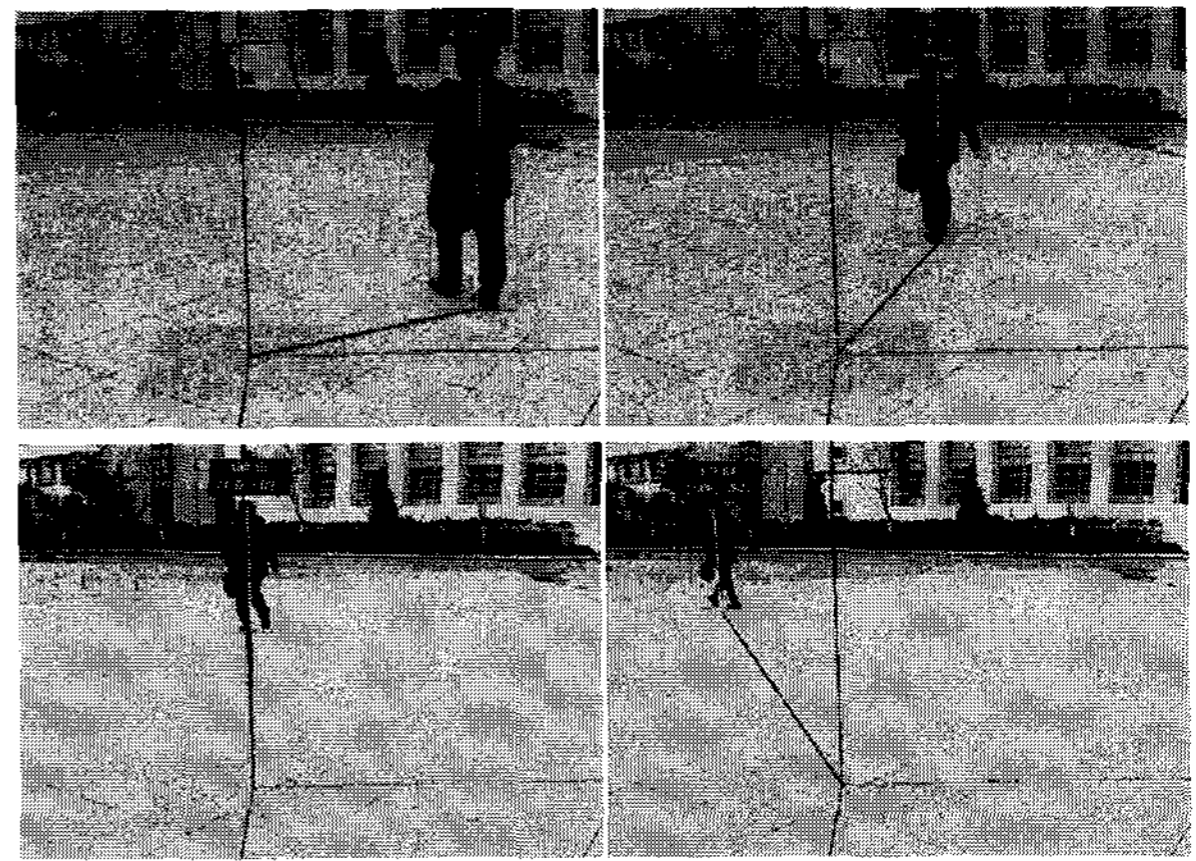


(c)

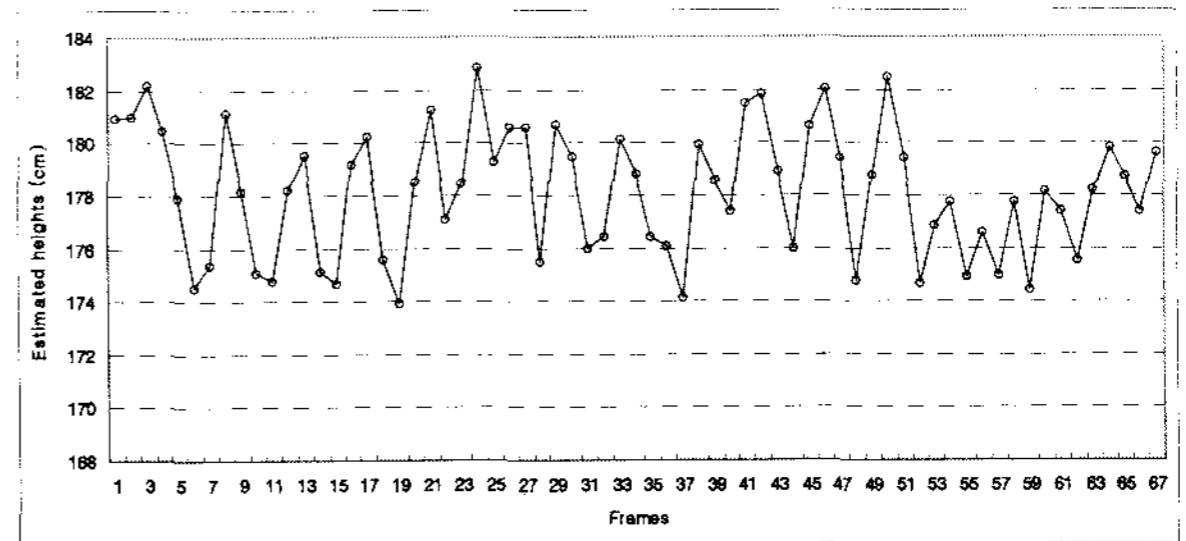
그림 12. 실험 2 (a) 이동 중인 보행자의 위치 및 높이 계산 과정 (b) 높이 계산 결과 (c) 위치 계산 결과 및 상면도

Fig. 12. Experimental results 2 (a) Estimation of heights and positions of an individual (b) Estimated heights (c) Bird's eye view of (a) which illustrates estimated positions

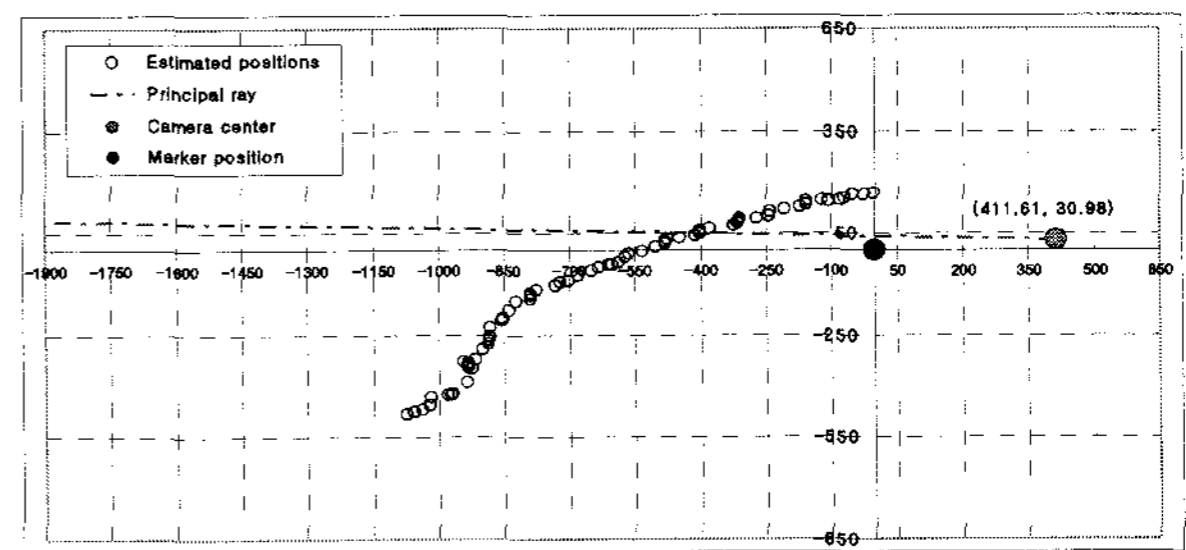
메라의 위치 및 주선의 방향은 역사영 오차 보정에 사용된 호모그래피를 이용하여 보정된 결과이다. 실험 결과로부터 제안된 기법은 카메라와 보행자 사이의 거리 및 상대적인 위치변화에 다소의 영향을 받기는 하지만, 높이 및 위치 계산 결과에 심각한 오차를 발생시키지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 한편 영상 내의 잡음 및 이로 인한 부정확한 마커 좌표의 추출로 인하여 보행자가 카메라로부터 멀어질수록 높이 및 위치의 계산값이 다소 증가하는 것이 확인된다. 따라서 이를 보정하기 위한 별도의 기법이 고려된다면, 보다 정확한 결과를



(a)



(b)



(c)

그림 13. 실험 3 (a) 이동 중인 보행자의 위치 및 높이 계산 과정 (b) 높이 계산 결과 (f) 위치 계산 결과 및 상면도

Fig. 13. Experimental results 3 (a) Estimation of heights and positions of an individual (b) Estimated heights (c) Bird's eye view of (a) which illustrates estimated positions

표 1. 보행자의 높이 계산 결과

Table 1. The results of height estimations.

		실제 높이 (cm)	평균 (cm)	표준편차 (cm)	중간값 (median) (cm)
실험 1	경로 1	185.00	184.83	2.56	184.89
	경로 2		185.88	2.33	185.79
	경로 3		185.58	2.15	185.47
실험 2		168.00	167.08	3.08	169.65
실험 3		177.00	178.00	2.46	178.19

얻을 수 있을 것이다. 일반적인 환경에서 임의의 방향으로 이동하는 보행자에 대한 실험 결과를 그림 12, 그림 13 및 표 1에 보인다. 각각의 결과로부터 보행자의 높이 및 보행자의 위치, 이동 거리 등을 확인 할 수 있으며, 실험에 참여한 보행자의 실제 키 높이 및 이동 경로 등에 심각한 오차가 발생하지 않음을 확인하였다.

V. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 단일 카메라를 이용한 보행자의 위치 및 높이 계산 기법을 제안하였다. 이를 위해서 차분영상으로부터 객체의 영역 및 2차원 좌표를 추출한 다음, 이를 3차원 공간으로 역사영시키고, 객체의 3차원 공간에서의 위치 및 높이를 계산하였다. 한편, 정사각형 마커의 네 개의 꼭지점 좌표를 기반으로 카메라의 외부 파라미터를 계산하고 3차원 기준좌표계 상에서의 기준면을 검출하였다. 역사영된 좌표와 실제 좌표의 왜곡을 보정하기 위해서 이상적인 마커의 꼭지점 좌표와 역사영을 통하여 취득된 꼭지점 좌표 사이의 변환 관계를 계산한 다음, 이를 객체의 위치 및 높이 계산 결과의 보정에 이용하였다. 성능 평가를 위한 실험에서는 실제 비디오 영상으로부터 보행자의 위치 변화에 대한 정량적인 측정 결과를 구하고, 이를 바탕으로 제안된 방법의 정확도 및 안정성을 분석 및 평가하였다. 제안된 방법은 객체의 이동 및 위치 변화에 다소의 영향을 받지만 심각한 오차 없이 안정된 결과를 보여준다는 것을 실험 결과로부터 확인하였다. 제안된 객체의 위치 및 높이 계산 기법은 단일 영상만을 이용하여 보행자의 3차원 공간 상의 위치 및 높이의 계산이 가능하며, 따라서 다중 카메라 기반의 기법에서 발생할 수 있는 문제점 및 어려움을 배제할 수 있다. 또한 기존의 단일 영상 기반의 기법이 객체의 높이 또는 위치 정보만 추정 가능했던 것에 비해서 제안된 방법은 3차원 공간상의 위치 및 높이의 동시 취득이 가능한 장점이 있다. 제안된 기법은 일반적으로 많이 사용되는 단일 카메라 기반의 감시, 통제, 보안 시스템 등에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

향후 진행될 연구에서는 다수의 객체 검출 및 객체 간 가려짐 영역의 처리 등과 같은 다중 객체의 검출 및 위치/높이 계산에 대한 과정이 포함 될 예정이다. 그리고 이를 바탕으로 한 다중 객체의 추적 시스템에 대한 연구가 진행될 예정이다.

참고 문헌

- [1] D. Leibowitz, A. Criminisi, and A. Zisserman, "Creating Architectural Models from Images," Proc. EuroGraphics'99 vol.18, No.3, Sep. 1999.
- [2] A. Criminisi, I. Reid, and A. Zisserman, "Single View Metrology," Int'l J. Computer Vision, vol. 40, no. 2, pp. 123-148, 2000.
- [3] O. Faugeras, "Three-Dimensional Computer Vision," The MIT Press, 1993.
- [4] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," Cambridge Univ. Press, 2003.
- [5] G. Golub and C. Loan, "Matrix Computations: 3rd ed.," Johns Hopkins Univ. Press, 1996.
- [6] Z. Zhang, "Flexible New Technique for Camera Calibration," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 7, pp. 1330-1334, Nov. 2000.
- [7] A. Criminisi, "Single-View Metrology: Algorithms and Application," Proceedings of the 24th DAGM Symposium on Pattern Recognition, 2002.
- [8] A. Criminisi, "Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images," Springer-Verlag, 2001.
- [9] C. BenAbdelkader, R. Cutler, and L. Davis, "Person Identification using Automatic Height and Stride Estimation," Proc. European Conf. Computer Vision, pp. 155-158, June. 2002.
- [10] L. Havasi, Z. Szlávik, and T. Szirányi, "Detection of Gait Characteristics for Scene Registration in Video Surveillance System," IEEE Trans. Image Processing, vol. 16, no. 2, pp. 503-510, Feb. 2007.
- [11] Z. Liu and S. Sarkar, "Improved Gait Recognition by Gait Dynamics Normalization," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 28, no. 6, pp. 863-876, June 2006.
- [12] L. Lee, R. Romano, and G. Stein, "Monitoring Activities from Multiple Video Streams: Establishing a Common Coordinate Frame," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 8, pp. 758-769, Aug. 2000.
- [13] W. Hu, M. Hu, X. Zhou, T. Tan, J. Lou, and S. Maybank, "Principal Axis-Based Correspondence between Multiple Cameras for People Tracking," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 28, no. 4, pp. 663-671, Apr. 2000.

- [14] K. Kim and L. Davis, "Multi-camera Tracking and Segmentation of Occluded People on Ground Plane Using Search-Guided Particle Filtering," Proc. European Conf. Computer Vision, Part III, pp. 98-109, May 2006.
- [15] S. Khan and M. Shah, "A Multiple View Approach to Tracking People in Crowded Scenes Using a Planar Homography Constraint", Proc. European Conf. Computer Vision, Part IV, pp. 133-146, May 2006.
- [16] S. Khan and M. Shah, "Consistent Labeling of Tracked Objects in Multiple Cameras with Overlapping Fields of View," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no. 10, pp. 1355-1361, Oct. 2003.
- [17] W. Hu, T. Tan, L. Wang, and S. Maybank, "A Survey on Visual Surveillance of Object Motion and Behaviors," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 34, no. 3, pp. 334-353, Aug. 2004.
- [18] I. Haritaoglu, D. Harwood, and L. Davis, "W4: Real-time Surveillance of People," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 8, pp. 809-830, Aug. 2000.
- [19] S. Mckenna, S. Jabri, J. Duric, H. Wechsler, and A. Rosenfeld, "Tracking Groups of People," Comput. Vision and Image Understand. 80, pp. 42-56, 2000.
- [20] B. Liang, Z. Chen, and Nick Pears, "Uncalibrated Two-View Metrology," Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition, vol. 1, pp. 96-99, Aug. 2004.
- [21] J. Gomez, G. Simon, and M. Berger, "Calibration Errors in Augmented Reality: a Practical Study," Proc. IEEE and ACM Int'l Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 154-163, June. 2005.

 저 자 소 개



이 석 한(정회원)
 1999년 2월 중앙대학교
 전자공학과 졸업 (공학사)
 2001년 2월 중앙대학교 첨단영상
 대학원 졸업 (공학석사)
 2001년~2004년 LG전자
 주임연구원

2008년 현재 중앙대학교 첨단영상대학원
 박사과정 재학 중

<주관심분야: 실시간 카메라 추적, 증강현실, 3차
 원 컴퓨터 비전>

최 종 수(평생회원)-교신저자
 대한전자공학회 논문지
 제 45권 SP편 제 2호 참조