

악조건하의 비동일평면 카메라 교정을 위한 알고리즘

An Algorithm for Ill-Conditioned Non-Coplanar Camera Calibration

안택진, 이문규

(Taek-Jin Ahn and Moon-Kyu Lee)

Abstract : This paper presents a new camera calibration algorithm for ill-conditioned cases in which the camera plane is nearly parallel to a set of non-coplanar calibration boards. For the ill-conditioned case, most of existing calibration approaches such as Tsai's radial-alignment-constraint method cannot be applied. Recently, for the ill-conditioned coplanar calibration, Lee & Lee[16] proposed an iterative algorithm based on the least square method. The non-coplanar calibration algorithm presented in this paper is an iterative two-stage procedure which extends the previous coplanar calibration algorithm. Through the first stage, camera position and orientation parameters as well as one radial distortion factor are determined optimally for a given data of the scale factor and the focal length. In the second stage, the scale factor and the focal length are locally optimized. This process is repeated until any improvement cannot be expected any more. Computational results are provided to show the performance of the algorithm developed.

Keywords : machine vision, non-coplanar camera calibration, ill-conditioned calibration, nonlinear optimization model

1. 서론

머신비전은 영상처리와 영상분석을 함께 사용하는 기술로서 대표적인 실제응용예로는 제조공정에서 발생하는 다양한 결함들을 검사하는 시스템을 들 수 있다. 이러한 머신비전을 이용하여 제품의 특성인 치수나 면적, 직경 등의 검사를 통한 양, 불량검사에 적용하기 위한 시각인식 시스템을 구축할 때에는 반드시 영상좌표계(image coordinate system)와 실세계좌표계(world coordinate system)와의 관계를 규명하는 카메라 교정(camera calibration)이 이루어져야 한다. 일반적으로 카메라 교정에 요구되는 인자들은 크게 두 그룹으로 구분할 수 있는데, 영상을 입력받는 렌즈의 광학적인 특성과 카메라의 내부구조 특성을 나타내는 내부인자와 특정 실세계 좌표 계를 기준으로 하여 카메라의 3차원적인 위치 및 방향정보를 나타내는 외부인자로 나뉜다. 카메라의 내부인자들은 카메라의 유효초점거리(f)와 렌즈의 왜곡을 반영하는 인자(k), 카메라의 주사와 영상회색시 발생하는 시차로 발생하는 오차를 보정하는 확대인자(scaling factor, S_s)로 구성된다. 한편 외부인자들은 실세계 좌표의 원점에서 카메라의 위치가 얼마만큼 이동하여 있는가를 나타내는 이동벡터(t_x, t_y, t_z)와 카메라의 각 축에 대한 회전상태를 나타내는 회전행렬 R 로 구성된다. 일반적으로 카메라 교정은 핀홀(pin-hole) 카메라 모형을 가정하여 각 인자들의 관계를 나타내는 수리적인 모형을 수립한 후 다수의 오차교정점(calibration points)의 실세계 좌표값을 입력하여 이 인자들을 추정하는 과정이다[1].

이러한 카메라 교정분야는 현재에도 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로서 지금까지 여러 가지 기법들이 개발되어 왔다. 대표적인 연구로서 Tsai[1]은 동일평면상(coplanar) 또

는 비동일평면상(non-coplanar)에 대상물체가 위치한 경우에 대하여 그 물체의 실세계 좌표값과 그에 대응되는 프레임그리머상의 영상좌표값을 이용하여 방사상(radial) 오차를 포함시킨 카메라 교정 모형을 제안하였다. Weng 등[2]은 후에 Tasi 모형에서 제외시킨 접선왜곡(tangential distortion)과 thin prism 왜곡을 포함시킨 모형을 발표하였다. 또한 Chatterjee 등[3]은 Weng 등의 방법의 단점인 최적해로의 수렴성 여부의 불확실성을 보완하기 위한 2단계 최적화 과정을 제시하였다. 이 분야에 대한 국내의 연구로는 한민홍·이상용[4]의 원형 표식을 이용한 교정방법과 김계영 등[5]의 사각형특성과 대략적인 높이 정보를 이용한 카메라교정방법을 제시한 바 있고, 최근에 안정호[6]가 두 개의 보정평면과 사교좌표(oblique coordinate)매핑을 이용한 교정 알고리즘을 발표하였다.

이상의 일반적인 카메라 교정에서는 그 수리모형의 특성상 그림 1(a)에서와 같이 카메라와 대상 물체가 있는 평면의 수직선과의 상대적인 각도인 β 가 30° 이상을 유지하여야 만이 비교적 정확한 결과가 기대된다[1]. 그러나 산업현장의 대표적인 적용분야는 일반적으로 그림 1(b)와 같이 카메라 CCD 소자 평면과 물체의 평면이 평행하거나 거의 평행한 형태로 위치하는 경우가 많다[7]-[11]. 이러한 구조에서는 카메라 좌표계의 Z축이 실세계 Z_w 축과 거의 일치하게 되고, 카메라좌표계와 실세계좌표계와의 관계를 나타내는 회전변환 행렬의 일부 원소들이 정확히 평행인 경우에는 0, 거의 평행한 경우에는 매우 작은 값을 갖게 된다. 이러한 경우 Tsai 알고리즘 같은 일반적인 카메라 교정 해법을 적용하면 구하여야 할 인자 중 초점거리와 Z축의 이동량이 서로 독립적인 관계가 될 수 없다. 즉, 수리적으로 부정상태의 문제가 되어 정확한 인자 값을 계산할 수 없는 어려움이 있게 된다. 이러한 경우를 카메라 교정에 있어서 악조건 하에 있다고 한다[12].

이와 같은 악조건문제를 해결하기 위한 기존의 국내 연

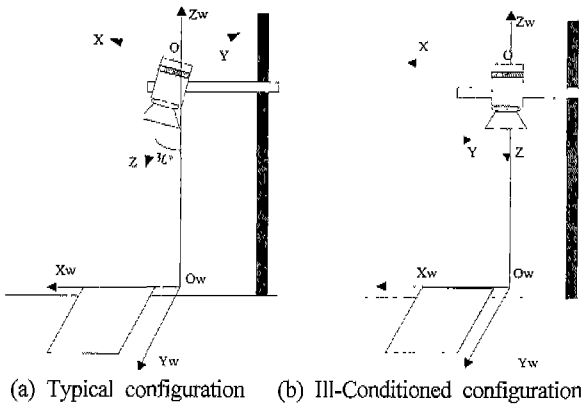


그림 1. 2가지 유형의 카메라 교정 시스템 구조.
Fig. 1. Types of camera calibration configuration.

구로서 이문규 · 이정화[13]는 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron)을 이용한 교정방법을 제시하였고, 이상경 등[14]은 퍼지 함수를 이용하여 왜곡오차를 보정하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법들은 실세계좌표와 영상좌표간의 관계를 수리적으로 표현하기 어렵기 때문에 각 교정인자의 값을 알 수 없는 단점이 있다. 국의 연구로는 Tsai & Lenz[15]가 정확히 평행한 경우에 대하여 알고리즘을 개발하였고, Zhuang & Wu[12]는 거의 평행한 경우에 대하여 알고리즘을 제시하였다. Zhuang & Wu의 연구에서는 약조건 문제의 특성을 이용하여 회전변환행렬 R의 원소 값들을 단순화시키고 최소자승법(Least Square Method : LSM)을 이용하여 필요한 인자 값들을 구하게 된다. 그런데 초점거리와 축척인자들의 정확한 값을 미리 알고 있어야 하는 제약이 있다. 즉, Tsai의 방법과 같은 기존의 비동일평면 카메라교정 알고리즘을 이용하여 이 두 개의 인자를 미리 구한 후 이를 근거로 하여 나머지 인자를 구해야 한다는 것이다.

이러한 약점을 보완하기 위하여 이문규 · 이정화[16]의 연구에서는 초점거리와 축척인자를 미리 구하지 않고 약조건 문제를 해결하는 알고리즘을 개발하였다. 그러나, 이 알고리즘은 대상물의 높이 차를 무시하여도 되거나 대상물들의 높이가 모두 같아서 하나의 평면상에 있는 경우에만 적용될 수 있다. 예로서, 선반공구인 인서트(insert) 표면의 균열을 검사하거나 PC 기관의 인쇄상태를 검사하는 경우를 들 수 있다. 그러나, 대상 물체가 3차원으로서는 높이 차를 무시할 수 없거나 동일평면에 있더라도 대상물의 변화에 따라 수시로 평면 높이가 변화하는 경우와 같이 대상면이 모두 동일 평면에 존재하지 않는 경우(non-coplanar)에는 높이에 따른 영향을 고려해야 하기 때문에 이 알고리즘을 그대로 적용할 수가 없다. 즉, 동일평면에서는 대상물을 정의하는 좌표로서 X, Y, Z의 3축 중에서 2축, 예컨대 X와 Y축의 실세계 좌표만을 사용하여 영상 좌표가 결정되게 되어 있으나 (편의상 Z축의 값을 0으로 설정하여 수식을 간단하게 처리함), 비동일평면에서는 X, Y, Z의 3축이 모두 정의되어야 하므로 이를 반영하는 카메라 교정이 되어야 하는 것이다. 이에 본 연구에서는 이러한 비동일평면에 대하여도 약조건을 갖는 문제를 해결할 수 있는 새로운 비동일평면 카메라 교정 알고리즘을 제시하고자 한다.

II. 일반적인 카메라 교정 모형

일반적인 카메라 교정을 위한 대표적인 알고리즘인 Tsai [1]의 교정 방법에서는 내부인자로 f, k, S_x 와 외부인자들로 는 이동벡터 (t_x, t_y, t_z)와 Z, Y, X 축에 대한 회전각도 α, β, γ 의 함수로 표현되는 회전행렬 R을 고려하였다. 각 인자들의 관계를 수리적 비선형 모형으로 정형화한 후 다수의 교정점의 실세계 좌표 값과 그에 대응되는 영상 좌표 값들을 이용하여 동일 · 비동일 평면에 대해서 카메라 교정을 수행하게 된다. 이러한 카메라 교정모형은 다음과 같이 정형화 된다:

단계 1 : 3D 실세계 좌표계상의 (x_w, y_w, z_w)를 카메라 좌표계 (x, y, z)로 변환:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T.$$

여기서, $R = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_4 & R_5 & R_6 \\ R_7 & R_8 & R_9 \end{bmatrix}$, $T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 이다.

단계 2 : 핀홀(pin hole) 카메라 모형을 이용하여 오차가 없는 카메라 영상좌표계(X_u, Y_u)로 변환: $X_u = f \frac{x}{z}$, $Y_u = f \frac{y}{z}$.

단계 3 : 단계 2에서 변환된 영상좌표계에 방사상 오차 (D_x, D_y)를 보정:

$$X_u = X_d + D_x, \quad Y_u = Y_d + D_y$$

$$\text{단, } D_x = X_d(k_1 \xi^2 + k_2 \xi^4 + \dots),$$

$$D_y = Y_d(k_1 \xi^2 + k_2 \xi^4 + \dots),$$

$$\xi = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}, \quad k_1, k_2, \dots \text{는 작은 상수.}$$

단계 4 : 최종적으로 (X_d, Y_d)를 컴퓨터 프레임그래버에 나타나는 영상 좌표계 (X_f, Y_f)로 변환:

$$X_f = S_x d_x^{-1} X_d + C_x, \quad Y_f = d_y^{-1} Y_d + C_y$$

단, $\begin{cases} d_x = \text{CCD 소자의 } x\text{축 센서의 크기,} \\ d_y = \text{CCD 소자의 } y\text{축 센서의 크기,} \\ N_{cx} = \text{CCD 소자의 } x\text{축 방향 센서의 개수,} \\ N_{fx} = \text{프레임 그래버의 } x\text{축 방향 화소의 개수,} \\ d_x = d_x(N_{cx}/N_{fx}). \end{cases}$

단계 3에서 일반적으로 r 이 매우 작은 값을 갖기 때문에 4차항 이상을 무시하고, (0,0)에 있는 영상 원점을 (C_x, C_y)로 이동시킨 후, 위 4 단계의 모든 변환과정을 정리하면 실세계좌표(x_w, y_w, z_w)와 영상좌표(X, Y)와의 관계는 아래와 같이 표현된다:

$$X = X_f - C_x, \quad Y = Y_f - C_y \tag{1}$$

$$S_x^{-1} d_x X + S_x^{-1} d_x X k \xi^2 = f \frac{R_1 x_w + R_2 y_w + R_3 z_w + t_x}{R_7 x_w + R_8 y_w + R_9 z_w + t_z} \tag{2}$$

$$d_y Y + d_y Y k \xi^2 = f \frac{R_4 x_w + R_5 y_w + R_6 z_w + t_y}{R_7 x_w + R_8 y_w + R_9 z_w + t_z} \tag{3}$$

$$\text{단, } \xi = \sqrt{(S_x^{-1} d_x X)^2 + (d_y Y)^2}.$$

Tsai의 동일평면 또는 비동일평면 카메라교정 알고리즘에서는 주어진 교정점들로부터 구하고자 하는 인자 수 이상

의 실제 좌표값과 그에 대응되는 영상상의 좌표값이 주어지면 방정식 (2)과 (3)를 이용하여 각 인자 $\{R, T, k, f, S_x\}$ 에 대한 추정치를 구하게 된다. 그러나 악조건 문제에서는 카메라 좌표계의 X-Y 평면과 실제 좌표계의 Xw-Yw 평면이 서로 거의 평행한 상태에 있으므로 회전행렬 R의 원소 중 R_{77} 과 R_{88} 이 대단히 작은 값을 갖게 된다. 따라서, 예로서 교정대상 평면의 z_w 값을 0으로 놓으면 (2)과 (3)식의 우항에서 분모 t_z 만 남게 되므로 f 와 t_z 가 서로 독립적인 관계가 될 수 없기 때문에 이러한 수리적인 모형으로서는 인자들의 추정치를 구하기가 어렵다.

III. 악조건하의 비동일평면 카메라 교정을 위한 알고리즘

1. 카메라 교정을 위한 전역(global) 최적화 모형

Zhuang & Wu는 악조건하의 동일평면 카메라 교정을 위하여 2절에 기술된 일반적인 카메라 교정에서 발생하는 수리적인 부정상태의 어려움을 피하기 위하여 동일평면에 대해서 S_x 와 f 값을 미리 알고 있다고 가정하고(실제로는 비동일평면 카메라 교정모형을 이용하여 두 인자 값을 미리 추정함) 나머지 인자인 $\{R, T, k\}$ 추정치를 구하는 수리적 모형을 제시하였다. 특히, 동일평면을 대상으로 하기 때문에 교정점들이 모두 $z_w = 0$ 인 평면에 있는 경우만을 고려하게 되므로 모형의 식들이 비교적 간단하게 표현되고 있다. 제시된 수리적 모형의 해를 구하기 위해서는 인자들을 두 그룹으로 분할하고 각 그룹에 대한 선형방정식을 세운 다음 이를 최소자승법을 이용하여 해결하는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제시된 악조건하의 비동일평면을 위한 카메라 교정 알고리즘에서도 Zhuang & Wu의 동일평면에 대한 접근방법을 응용하고 Zw축을 추가로 고려한 수리적인 모형을 이용한다. 우선 Xw-Yw 평면과 카메라 영상평면이 거의 평행이기 때문에 β 와 γ 값이 매우 작게되므로 $\cos\beta \cong 1, \sin\beta \cong \beta, \cos\gamma \cong 1, \sin\gamma \cong \gamma$ 로 근사화 되어 R행렬은 다음과 같이 표현된다:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & \beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha & \beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha \\ -\beta & \gamma & 1 \end{bmatrix}$$

다음으로 γ 값이 충분히 작을 때 $1 + k\xi^2 \cong (1 - k\xi^2)^{-1}$ 로 놓을 수 있으므로 (2)와 (3)는 다음 (4)와 (5)로 단순화된다:

$$\frac{X}{(1 - k\xi^2)} = f_x \frac{\cos\alpha x_w - \sin\alpha y_w + (\beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha)z_w + t_x}{-\beta x_w + \gamma y_w + z_w + t_z} \quad (4)$$

$$\frac{Y}{(1 - k\xi^2)} = f_y \frac{\sin\alpha x_w + \cos\alpha y_w + (\beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)z_w + t_y}{-\beta x_w + \gamma y_w + z_w + t_z} \quad (5)$$

단, $f_x = (S_x/d_x)f, f_y = (1/d_y)f, \mu = (f_y/f_x)$.

따라서, 교정점 i 에 대한 영상상의 좌표(X_i, Y_i)는 (4)와 (5)로부터

$$X_i = f_x \frac{(x_{wi}\cos\alpha - y_{wi}\sin\alpha + (\beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha)z_{wi} + t_x)(1 - k\xi^2)}{-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z} \quad (6)$$

$$Y_i = f_y \frac{(x_{wi}\sin\alpha + y_{wi}\cos\alpha + (\beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)z_{wi} + t_y)(1 - k\xi^2)}{-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z} \quad (7)$$

가 된다. 주어진 교정점들로부터 (6)과 (7)을 최대한 만족시키는 인자들을 구하기 위한 오차 제곱값의 합을 최소화하는 최적화 모형은 다음과 같이 정형화된다:

$$(P) \text{ MIN } Z = \sum_i \left[\left\{ X_i - f_x \frac{(x_{wi}\cos\alpha - y_{wi}\sin\alpha + (\beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha)z_{wi} + t_x)(1 - k\xi^2)}{-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z} \right\}^2 + \left\{ Y_i - f_y \frac{(x_{wi}\sin\alpha + y_{wi}\cos\alpha + (\beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)z_{wi} + t_y)(1 - k\xi^2)}{-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z} \right\}^2 \right] \quad (8)$$

s.t. $-2\pi \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 2\pi$

$S_x > 0, f > 0, t_x, t_y, t_z, k$: unrestricted.

이문규 · 이정화[13]와 Zhuang & Wu[12]에서 다루었던 동일평면을 위한 최적화 모형에서는 (8)의 z_w 값이 모두 0이 되어 모형이 단순화 될 수 있다. 그러나 이 모형은 z_w 가 0이 아닐 수 있으므로 카메라 인자들의 값을 추정하는 방법이 동일평면의 것과 달라지게 된다. 이 모형은 $\{\alpha, \beta, \gamma, S_x, f, t_x, t_y, t_z, k\}$ 의 9개의 결정변수로 이루어진 복잡한 비선형 최적화 모형으로서 일반적으로 알려진 최적화 기법[17]을 그대로 이용하여 해를 구할 경우 계산시간이 과다하게 소요될 뿐 아니라 최종결과가 초기치에 크게 좌우되는 어려움이 있다. 이러한 점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 2단계 반복절차를 제시한다. 즉, 단계 1에서는 최적화 모형 (P)에 있는 카메라 인자들 중 우선 $\{S_x, f\}$ 를 기지인 것으로 가정하고 (6), (7)을 변형시켜 생성되는 선형모형으로부터 $\{R, T, k\}$ 추정한다. 다음, 단계 2에서는 이렇게 추정된 값들을 이용하여 (P)를 최적화하는 $\{S_x, f\}$ 를 구하여 처음 단계 1부터 반복 수행한다. III.2절에서는 단계 1을, III.3절에서는 단계 2를 설명한다.

2. S_x 와 f 가 기지인 경우 (R, T, k) 추정

이 모형에서 구하여야 할 인자들은 S_x 와 f 는 기지인 것으로 가정하였으므로 R을 정의하는 회전각도 $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ 와 그 밖의 인자인 $\{k, t_x, t_y, t_z\}$ 가 된다. 이 인자들을 $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y\}$ 와 $\{k, t_z\}$ 의 두 그룹으로 나누어서 단계적으로 인자들의 값을 추정하게 된다. 먼저, (6)과 (7)에서 오른쪽 항의 분모가 모두 같기 때문에 이식들을 서로 나누면 다음 식과 같이 정리된다:

$$(x_{wi}Y_i - y_{wi}X_i\mu)t_y^{-1}\cos\alpha - (y_{wi}Y_i + x_{wi}X_i\mu)t_y^{-1}\sin\alpha + Y_it_x t_y^{-1} + z_{wi}Y_i(\beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha)t_y^{-1} - z_w Y_i\mu(\beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)t_y^{-1} = X_i\mu \quad (9)$$

우선, $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y\}$ 는 이 식으로부터 일련의 실제좌표(X_w, Y_w, Z_w)와 그에 대응되는 (1)의 영상좌표(X_i, Y_i)가 주어지면 최소자승법을 이용하여 구할 수 있다. 여기서,

$$v = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

$$= \{t_y^{-1}\cos\alpha, t_y^{-1}\sin\alpha, t_x t_y^{-1}, (\beta\cos\alpha + \gamma\sin\alpha)t_y^{-1}, (\beta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)t_y^{-1}\}$$

로 정의하면 $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y\}$ 는 아래와 같이 계산된다:

$$\alpha = \text{Atan}(v_1/v_2), \quad \beta = \frac{v_2 v_5 + v_1 v_4}{v_2^2 - v_1^2},$$

$$\gamma = \frac{v_2 v_4 - v_1 v_5}{v_2^2 + v_1^2},$$

$$t_y = \cos\alpha/v_1 \text{ or } \sin\alpha/v_2, \quad t_x = v_3 t_y.$$

다음으로 k 와 t_z 는 (6)과 (7)을 정리한 아래 (10)와 (11)을 이용하여 역시 최소자승법을 이용하여 구할 수 있다.

$$X_i t_z + \xi^2 p k = p + X_i x_{wi} \beta - X_i y_{wi} \gamma - X_i z_{wi} \quad (10)$$

$$Y_i t_z + \xi^2 q k = q + Y_i x_{wi} \beta - Y_i y_{wi} \gamma - Y_i z_{wi} \quad (11)$$

단, $p = f_x(x_{wi} \cos \alpha - y_{wi} \sin \alpha + (\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha) z_{wi} + t_x)$,
 $q = f_y(x_{wi} \sin \alpha + y_{wi} \cos \alpha + (\beta \sin \alpha - \gamma \cos \alpha) z_{wi} + t_y)$.

이와 같은 과정을 통해서 $\{\alpha, \beta, \gamma, k, t_x, t_y, t_z\}$ 의 모든 인자들의 값을 구할 수 있다. $\{S_x, f\}$ 가 기지인 경우에는 이렇게 구한 값들을 (6)과 (7)에 입력하면 실제계좌표와 영상좌표 간의 관계를 규명할 수 있게 된다. 그렇게 되면 물체평면과 카메라 영상평면이 거의 평행한 경우에 대하여 교정할 수 있고 Tsai 알고리즘에서의 수리적 약조건을 배제할 수 있다. 다음절에서는 $\{S_x, f\}$ 의 초기치 값을 개선하는 지역(local) 최적화 과정을 기술하고 있다.

3. S_x 와 f 의 지역 최적화

최적화 모형 (P)의 9개의 결정변수들 중 $\{S_x, f\}$ 를 제외한 $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z, k\}$ 의 추정치를 앞절의 방법을 이용하여 구할 수 있으므로 이를 다음과 같이 상수화하면

$$a_i = \frac{(x_{wi} \cos \alpha - y_{wi} \sin \alpha + (\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha) z_{wi} + t_x)(1 - k \xi_i^2)}{d_x'(-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z)}$$

$$b_i = \frac{(x_{wi} \sin \alpha + y_{wi} \cos \alpha + (\beta \sin \alpha - \gamma \cos \alpha) z_{wi} + t_y)(1 - k \xi_i^2)}{d_y'(-\beta x_{wi} + \gamma y_{wi} + z_{wi} + t_z)}$$

(P)의 목적함수 (8)은 기지의 값인 (X_i, Y_i) , a_i, b_i 의 함수로서

$$Z = \sum_i [(X_i - a_i S_x f)^2 + (Y_i - b_i f)^2] \quad (12)$$

로 단순화된다. 여기서 Z 의 지역 최적해는 S_x 와 f 각각에 대하여 미분하여 구할 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial Z}{\partial S_x} = -2f \sum_i a_i (X_i - a_i S_x f) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial f} = -2S_x \sum_i [a_i (X_i - a_i S_x f) + b_i (Y_i - b_i f)] = 0 \quad (14)$$

(13)은 f 가 0가 아니기 때문에 $\sum_i a_i (X_i - a_i S_x f) = 0$ 이 되어야 하므로 (14)는

$$\frac{\partial Z}{\partial f} = -2 \sum_i b_i (Y_i - b_i f) = 0$$

이 된다. 따라서 S_x 와 f 의 지역 최적해는 다음과 같이 정리된다:

$$\hat{f} = \frac{\sum_i b_i Y_i}{\sum_i b_i^2} \quad (15)$$

$$\hat{S}_x = \frac{\sum_i a_i X_i / \hat{f}}{\sum_i a_i^2} \quad (16)$$

이정화·이문규[4]는 $z_w = 0$ 일 때 $\{\hat{S}_x, \hat{f}\}$ 가 비제약하에서 (12)식의 Z 를 전역 최소화하는 값이라고 증명한 바 있다. 또

한, $\{S_x, f\}$ 와 나머지 7개의 인자들로 나누어서 부분최적화를 반복적으로 수행하는 것이 결국은 지역 최적해로 수렴한다는 것을 보였는데, $z_w \neq 0$ 일 때도 이는 성립한다.

4. 비동일평면 카메라 교정 알고리즘

III.2절에서는 $\{S_x, f\}$ 가 기지일 때 나머지 인자들의 값을 구하는 방법을 제시하였고 III.3절에서는 $\{S_x, f\}$ 값을 개선하는 지역 최적화 모형을 기술하였다. 여기서는 앞서 기술된 수리적 모형들을 바탕으로 하여 약조건 하의 비동일평면 카메라 교정을 위한 새로운 알고리즘을 제시한다.

먼저 n 개의 교정점에 대한 실제계좌표 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 로부터 그에 대응되는 영상상의 좌표 (X_i, Y_i) 를 구한다. 영상좌표 (X_i, Y_i) 는 프레임 그래버에 의해 표시되는 좌표계 (X_b, Y_b) 에서 영상중심 좌표 (C_x, C_y) 를 제한 것으로서

$$(X_i, Y_i) = (X_b, Y_b) - (C_x, C_y)$$

이다. 본 논문에서 사용된 프레임 그래버가 512×512 의 CCD센서 배열을 가지므로 (C_x, C_y) 는 그 중앙인 $(256, 256)$ 이 된다. 이와 더불어 초기화 작업으로서 $\{S_x, f\}$ 의 초기치를 정한다. 단계 1에서는 이러한 입력 값들을 이용하여 우선 식 (9)를 세운 후 최소자승법을 이용하여 $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y\}$ 의 값을 구한다. 마찬가지로 (10), (11)을 이용하여 $\{k, t_z\}$ 의 값을 결정한다. 이렇게 되면 단계 2의 입력자료인 a_i, b_i 와 이 때의 목적함수 값 Z 가 계산될 수 있다. 여기서 종료조건 중의 하나인 (12)의 Z 값이 직전의 Z 값보다 증가하거나 변화가 없으면 종료하고 그렇지 않으면 단계 2로 진행하게 된다. 단계 2에서는 a_i 와 b_i 를 가지고 (15)와 (16)으로부터 새로운 $\{S_x, f\}$ 를 계산하여, 그 결과가 직전의 $\{S_x, f\}$ 값과 차이가 거의 없으면 종료한다. 그렇지 않으면, 단계 1로 되돌아가서 전체 알고리즘을 반복 수행하게 된다. 즉, 단계 1에서는 $\{S_x, f\}$ 가 주어진 부분최적화 문제 (P)의 전역 최적해를 구할 수 있고 단계 2를 수행하면서 목적함수 값이 더 이상 증가하지 않을 때까지 반복 수행하면 최적화문제 (P)의 지역 최적해에 도달하게 되는 것이다. 이러한 과정을 단계적으로 정리하면 다음과 같다:

단계 0 : < 초기화 > f 의 초기치 $f(0)$ 는 편의상 사양상에 표시된 카메라 렌즈의 물리적인 초점거리를 사용하고, S_x 의 초기치 $S_x(0)$ 는 카메라 CCD 센서의 X축 방향의 개수와 프레임 그래버의 X축 화소수와와의 비를 사용함.

단계 1 : < $\{S_x, f\}$ 가 기지인 경우 $\{R, T, k\}$ 추정 > 3.2절에 기술된 최소자승법을 이용하여 $\{S_x, f\}$ 가 주어졌을 때 우선 $\{\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y\}$ 의 최적해를 구하고, 이 값들을 이용하여 $\{k, t_z\}$ 의 최적해를 구함. 목적함수 Z 값이 전에 구한 것보다 증가하거나 변화가 없으면 중지함.

단계 2 : < $\{S_x, f\}$ 의 지역 최적화 > 단계 1의 결과로부터 a_i 와 b_i 를 계산한 후 (14)와 (15)를 이용하여 새로운 \hat{S}_x 와 \hat{f} 를 구함. 새로운 \hat{S}_x 와 \hat{f} 가 기존의 값과 차이가 거의 없으면 종료하고 그렇지 않으면 단계 1로 되돌아감.

IV. 카메라 교정 모델의 성능평가

1. 카메라 교정 시스템 구축

그림 2에서는 본 연구에서 개발한 알고리즘의 성능평가가

를 위한 시스템을 보여주고 있는데 그 구성요소들은 다음과 같다:

- CCD 흑백카메라: Teli-CS8320B(해상도 : 768(H)×494(V), 크기 : 8.4(H)×9.8(V)μm),
- 렌즈 : 12mm,
- 확장 링 : 0.5mm,
- 프레임그래버: CI-512 보드(해상도 : 512×512×8bits),
- 콘트롤러 : 486 PC(66 MHz),
- 디지털 버니어 캘리퍼스(0.01mm 정밀도).

본 연구에 사용된 Teli 카메라의 초점거리는 12mm이고, X 방향의 센서수가 768, 프레임 그래버의 X축 화소수가 512이므로 앞절의 단계 0에서 $f(0) = 12$, $S_x(0) = 768/512 = 1.5$ 로 초기화하였다. 카메라교정을 위한 입력 영상은 카메라와 거의 평행한 상태로 정반위에 부착되어 있고, 카메라와 입력 영상이 전 가시영역(Field of View)을 반영하기 위한 실세계 입력 영상과의 거리는 약 300mm이다. 입력 영상은 제작이 용이한 그래픽 소프트웨어(VISIO)를 이용하여 제작하여 1200 dpi의 해상도를 가진 프린트를 통하여 출력한 입력영상을 사용하였다. 또한, 비동일평면에 대한 Z축 변위를 측정하기 위하여 정반 옆에 0.01mm의 정밀도를 가진 디지털 버니어 캘리퍼스가 장착된 카메라 스탠드를 사용하였다. 입력 교정점의 영상은 기존의 연구에서 사용한 영상보다는 정밀도 면에서는 다소 떨어지지만, 그동안 다른 문헌에서 자주 사용된 2차원 평면위에 25(=5×5)개의 원을 사용하였다. 각 원의 지름은 2mm이고 각 점들과의 간격은 10mm로 하였다. 이러한 교정점들은 전 가시영역에 걸쳐서 균등하게 분포하도록 하였다. 카메라 교정과 본 연구에서 알고리즘의 성능 평가와 교정을 위한 실세계 좌표상의 교정점들은 그림 3에 주어진 가로 세로 각각 9개씩으로 총 81개를 사용하였다.

2. 알고리즘의 수렴성 평가

본 연구의 대상이 비동일평면이므로 이를 고려하기 위해서는 Z축의 값이 서로 다른 평면에 있는 교정점들을 사용해야 한다. 여기서는 간단하게 교정점의 입력 평면으로 $z_w = -3mm, 3mm$ 의 두 평면을 고려하였고 각 평면에서는 81개 중 25개의 교정점들을 전 평면에 골고루 분포되도록 선정하였다.

이와 같이 2평면에 정의된 교정점들을 가지고 아래와 같이 주어진 초기 조건에 대하여 개발된 알고리즘에 적용시킨

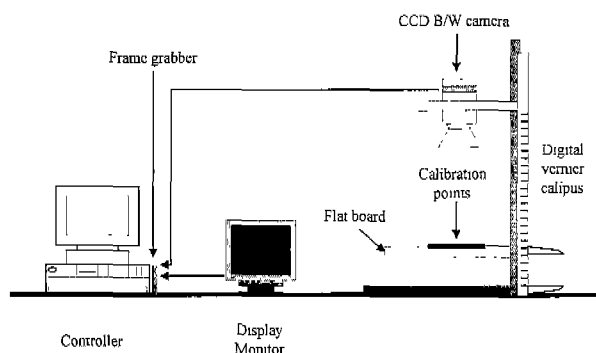


그림 2. 카메라 교정 시스템의 구성.
Fig. 2. Configuration of the implemented calibration system.

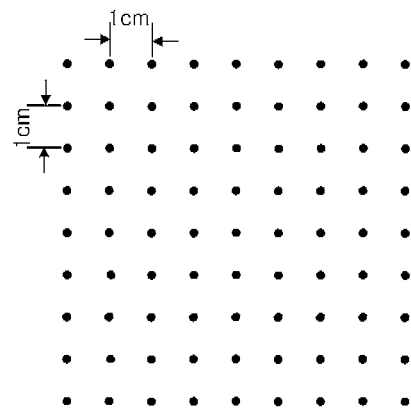


그림 3. 실세계상의 교정점 배치도.
Fig. 3. Layout of calibration points in the world coordinate system.

결과가 그림 4에 나타나 있다:

$$S_x(0) = 1.0, 1.5, 2.0; f(0) = 11.4, 12, 12.6.$$

그림 4의 (a), (b), (c)의 경우는 $f(0) = 12$ 로 고정되었을 때 초기치에 상관없이 S_x 가 모두 1.5096~1.5098로 수렴하는 것을 보여주고 있다. 그림에서 WIPE는 다음절에 기술한 바와 같이 실세계좌표에 대한 영상좌표 추정치의 오차를 나타낸다. 또한 그림 4의 (b), (d), (e)는 $S_x(0) = 1.5$ 로 고정되었을 때 f 값에 상관없이 거의 동일한 1.5096~1.5097에 수렴함을 보여주고 있다. 그러나 f 값은 초기치에 따라 일정한 값으로

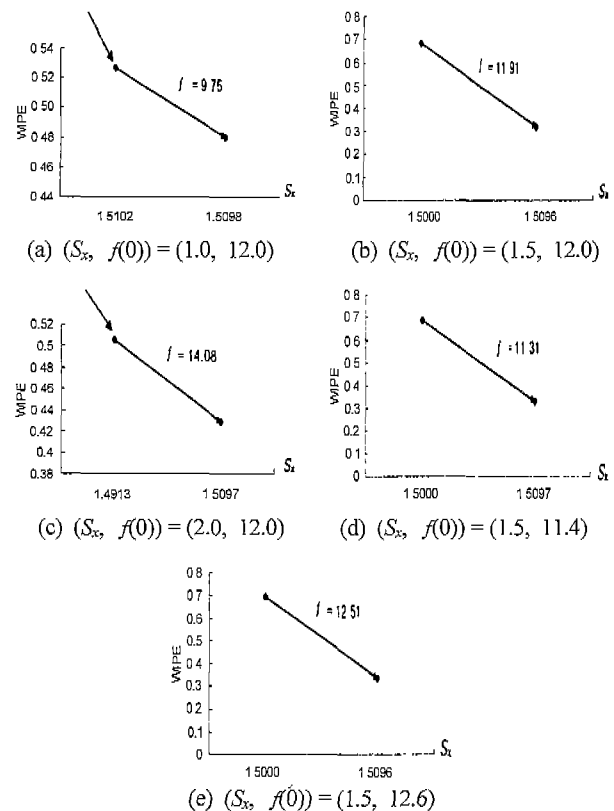


그림 4. 개발된 알고리즘의 수렴성에 대한 실험 결과.
Fig. 4. Experimental results showing the convergence of the developed iterative algorithm.

수렴되지는 않는 것으로 나타나고 있다. 그 이유는 $\mu = f_y/f_x = d'_x/d_x S_x$ 이므로 (9)에서 $\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y$ 가 결정이 되면 f 값에 상관없이 그 값이 결정되기 때문인 것으로 해석된다. 그러나, 실제 응용시에는 카메라 교정의 성능이 중요한 문제이고 f 의 값은 어떤 값이 되더라도 아무 문제가 없다.

3. 성능평가

카메라 교정 모형은 실세계좌표와 영상좌표와의 관계를 규명하는 수식으로 표현되기 때문에 알고리즘에 대한 성능평가 지수로서 양방향으로의 mapping 성능을 나타낼 수 있는 WIPE(World to Image Coordinate Prediction Error)와 IWPE(Image to World Coordinate Prediction Error)를 사용하였다. WIPE는 실세계 좌표에 대한 영상상의 추정좌표치와 실제 영상좌표와의 오차를, IWPE는 영상상의 점으로부터 추정 실세계 좌표의 오차를 나타내는 지수인데 각각 다음과 같이 정의된다:

우선, 교정점 i 에 대한 영상상의 추정좌표(X'_i, Y'_i)는 식 (6)과 (7)로부터 영상 중심점을 추가하여

$$(X'_i, Y'_i) = (X_i + C_x, Y_i + C_y)$$

로 구해진다. 따라서,

$$WIPE = \sum_i \sqrt{(X'_i - X''_i)^2 + (Y'_i - Y''_i)^2} / n$$

가 된다. 카메라 교정의 성과지수로서 만족할 만한 WIPE 값의 범위는 해당 응용시스템에서 요구되는 허용 오차보다는 작아야 하는데 문헌에 나와있는 실험적 수치들은 대개 0.5 pixel 내외이다[12][16][18].

다음으로 (x'_{wi}, y'_{wi})를 영상좌표로부터 계산된 교정점 i 의 실세계좌표 추정치라 하면 역시 (6)과 (7)으로부터 아래와 같이 구해진다:

$$x'_{wi} = \frac{B_i F_i - C_i E_i}{B_i D_i - A_i E_i}; \quad y'_{wi} = \frac{B_i C_i - A_i F_i}{B_i D_i - A_i E_i}$$

$$A_i = -X_i \beta - f_x \cos \alpha + k r_i^2 f_x \cos \alpha$$

$$B_i = X_i \gamma + f_x \sin \alpha - k r_i^2 f_x \sin \alpha$$

$$C_i = (f_x (\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha) - k r_i^2 f_x (\beta \cos \alpha + \gamma \sin \alpha)) z_{wi} + f_x t_x - k r_i^2 f_x t_x - X_i t_x$$

$$D_i = -Y_i \beta - f_y \sin \alpha + k r_i^2 f_y \sin \alpha$$

$$E_i = Y_i \gamma - f_y \sin \alpha + k r_i^2 f_y \cos \alpha$$

$$F_i = (f_y (\beta \sin \alpha - \gamma \cos \alpha) - k r_i^2 f_y (\beta \sin \alpha - \gamma \cos \alpha)) z_{wi} + f_y t_y + k r_i^2 f_y t_y - Y_i t_y$$

그러면 IWPE는 아래와 같이 정의된다:

$$IWPE = \sum_i \sqrt{(x_{wi} - x'_{wi})^2 + (y_{wi} - y'_{wi})^2} / n$$

카메라 교정시에는 앞의 수렴성평가 실험과 같이 25개의 교정점을 사용하지만 이러한 성능평가지수를 계산할 때는 그림 3에 주어진 81개의 모든 교정점을 대상으로 하였다. 이는 학습에 사용한 자료와 성능검정자료를 다르게 하여 교정의 효과를 엄밀하게 측정하기 위함이다.

교정 알고리즘의 성능평가에서 우선 Y축의 기울어진 정도에 따른 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 그림 5에 주어진 바와 같이 X축으로는 회전을 시키지 않고 Y축으로는 각각 $\beta=0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ$ 씩 기울이게 한 후 성능평가

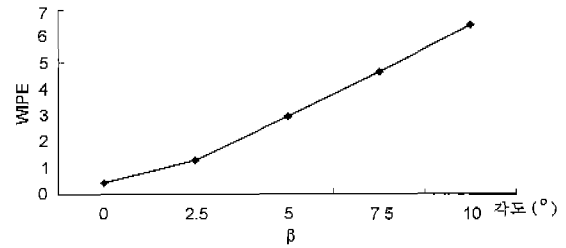


그림 5. β 값에 따른 WIPE값의 변화.
Fig. 5. WIPEs obtained for different β values.

지수인 WIPE를 산출하였다. 이 그림에서 보면 β 가 2.5° 정도까지는 우수한 교정 결과를 나타내고 있으나, 그 이상 기울어지게 되면 상당한 오차가 발생함을 볼 수 있다. 즉, 본 연구의 카메라 교정 모형의 대상인 약조건의 경우 (여기서는 X축과 Y축의 기울어진 정도가 거의 없는 경우)에는 카메라 교정이 우수하게 수행되고 있음을 보여주고 있다.

두 번째 성능평가는 기존의 동일평면 카메라 교정 알고리즘과의 비교에 관한 것이다. 진술한 바와 같이 기존의 카메라 교정 알고리즘은 이정화·이문규[16]가 제시한 것으로서 동일평면만을 대상으로 한다. 따라서 본 연구에서 제시된 알고리즘을 이용하여 비동일평면을 위한 카메라 교정을 실시한 후 이 결과를 가지고 동일평면을 대상으로 하여 비교하게 된다. 이에 따라, 먼저 $Z_w=0$ 인 평면을 대상으로 이정화·이문규의 알고리즘을 적용하여 동일평면 카메라 교정을 수행하였다.

다음으로는 본 연구에서 제시된 비동일평면 카메라 교정 알고리즘을 위하여 $Z_w = -5\text{mm}$ 와 5mm 인 2평면에 위치한 교정점들을 이용하여 카메라 교정을 실시한 후 성능비교를 위해서 $Z_w=0$ 인 위치에 있는 교정점들 81개를 대상으로 WIPE를 계산하였다. 이 결과가 표 1에 나타나 있는데 제시된 알고리즘의 성능이 비동일평면을 대상으로 하는 것임에도 불구하고 이정화·이문규의 동일평면 알고리즘의 성능과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 한편, 동일한 자료를 가지고 Tsai[1]의 알고리즘을 적용한 결과 약조건에 속하기 때문에 해가 구해지지 않았다. 이 표에서 X(pixel)와 X(mm)의 수치는 X축의 평균오차를 화소단위와 mm단위로 각각 나타낸 것이다. 이는 WIPE의 경우 영상상에서의 추정치 오차가 화소단위로 표현되고, IWPE에서는 실세계상의 좌표단위로

표 1. 이정화, 이문규의 알고리즘과 개발된 알고리즘과의 성능 비교.

Table 1. Performance comparison between the Lee & Lee's algorithm and the iterative procedure developed in this paper.

Lee & Lee's algorithm[13]			Iterative procedure developed in this paper			Tsai's non-coplanar method[1]
X (pixel)	Y (pixel)	WIPE (pixel)	X (pixel)	Y (pixel)	WIPE (pixel)	Not available
0.2288	0.2869	0.4305	0.2057	0.2322	0.4863	
X(mm)	Y(mm)	IWPE (mm)	X(mm)	Y(mm)	IWPE (mm)	
0.0538	0.0746	0.1008	0.0442	0.0474	0.0991	

표 2. 평면깊이의 변화에 따른 성능 변화.

Table 2. Performance observed for different Z-depths.

Z-depth	X(pixel)	Y(pixel)	WIPE (pixel)	X(mm)	Y(mm)	IWPE (mm)
4mm	0.3294	0.2203	0.5387	0.0510	0.0484	0.0996
6mm	0.2648	0.2064	0.4641	0.0536	0.0418	0.1003
8mm	0.2785	0.2038	0.4768	0.0537	0.0471	0.0981
10mm	0.2057	0.2322	0.4863	0.0442	0.0474	0.0991

나타나지 않기 때문이다.

마지막으로 본 연구에서 개발된 비동일평면 카메라교정 알고리즘의 성능에 영향을 미칠 가능성이 큰 영향요소는 Z 축으로 최저위치에 있는 평면과 최고위치에 있는 평면과의 차이를 나타내는 평면깊이(Z-depth)이다. 본 연구에서는 이 요소의 영향을 평가하기 위하여 4mm, 6mm, 8mm, 10mm의 4가지의 서로 다른 깊이에 대해서 실험을 수행하였다. 이 결과가 표 2에 주어져 있는데 4mm 깊이의 WIPE를 제외하고는 WIPE와 IWPE 모두 교정평면의 깊이 차에 대한 통계적 유의차는 없는 것으로 나타나기 때문에 다양한 깊이를 가진 실제 시스템에 대한 카메라 교정에 유용할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 악조건하의 비동일평면 카메라교정을 위한 알고리즘을 제시하였다. 우선 카메라 기울기가 카메라 교정성능에 미치는 영향을 분석하였고 다양한 Z축 깊이에 따른 성능 변화를 관찰하였다. 또한 악조건하의 동일평면 카메라 교정 알고리즘과 같은 조건상에서 비교한 결과 본 연구에서 개발한 알고리즘의 대상이 비동일평면 임에도 불구하고 동일평면만을 대상으로 하는 기존 연구와 성능면에서 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 연구는 영상 왜곡을 고려한 악조건하의 비동일평면 카메라교정을 위한 최초의 본격적인 연구로서 의의가 있다. 또한, 개발된 알고리즘은 교정 성능이 우수하여 악

조건하의 비동일평면 카메라 오차보정이 필요한 다양한 머신비전 시스템에 적용될 수 있으므로 시스템의 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다.

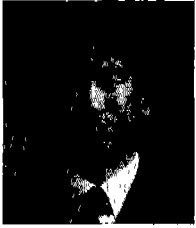
본 연구에서 개발된 알고리즘을 실제 현장에 응용하기 위해서는 그림 1에 도시된 바와 같이 한 대의 카메라를 대상 물체가 있는 평면과 최대한 수직으로 설치하여야 한다. 본 연구진은 이전의 연구에서 개발된 동일평면을 대상으로 하는 알고리즘[16]을 몇 개의 머신비전 시스템[11][19]에 활용하여 보았는데 그 결과 쉽게 구현할 수 있었고 비교적 우수한 결과를 얻은 바 있다. 그러므로, 비동일평면을 대상으로 한 본 연구의 카메라 교정 알고리즘도 유사한 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Tsai, R. Y., "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [2] Weng, J., Cohen, P., and Herniou, M., "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 10, pp. 965-980, 1992.
- [3] Chatterjee, C., Roychowdhury, V. P., and Chong, K. P., "A nonlinear gauss-seidel algorithm for noncoplanar and coplanar camera calibration with convergence analysis," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 67, no. 1, pp. 58-80, 1997.
- [4] 한민홍, 이상용, "원형 표식을 이용한 Camera Calibration에 관한 연구," 제11회 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 68-72, 1990.
- [5] 김계영, 고일주, 최형일, "사각형 특성과 대략적인 높이 정보(Z_b)에 의한 초점거리 추출," 한국정보과학회 불학술발표대회 논문집, 제21권, 제1호, pp. 259-262, 1994.
- [6] 안정호, "두 보정면과 사교좌표 매핑을 이용한 카메라 보정법," 한국정밀공학회지, 제16권, 제7호, pp. 119-124, 1999.
- [7] 왕한홍, 김종수, 한성현, 심삼한, "원전 증기발생기 세관검사용 비전시스템 개발에 관한 연구," 제11회 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 101-104, 1996.
- [8] 김갑중, 김가규, 전경한, 이승하, 이연정, 최봉열, "비전 시스템을 이용한 평판의 정렬 오차 추정," 제12회 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 919-922, 1997.
- [9] 양재호, 공영준, 이문규, "전자튜너 조정을 위한 위치와 방향 인식," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 39-49, 1999.
- [10] Liao, J. B., Wu, M. H., and Baines, R. W., "A coordinate measuring machine vision system," *Computers in Industry*, vol. 38, pp. 239-248, 1999.
- [11] 김인수, 이문규, "전자총 히터 자동검사를 위한 머신비전 알고리즘," 한국정밀공학회지, 제17권, 제3호, pp. 58-67, 2000.
- [12] Zhuang, H. and Wu, W.-C., "Camera calibration with near-parallel(III-conditioned) calibration board configuration," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 6, pp. 918-921, 1996.
- [13] 이문규, 이정화, "다층퍼셉트론의 정합 근사화에 의한 2차원 영상의 카메라 오차보정," 제어·자동화·시스템공학회지, 제4권, 제4호, pp. 280-286, 1998.
- [14] 이상경, 이언주, 이만희, 장동식, "머신 비전에 의한 측정 시 오차보정," 대한산업공학회 '95 추계학술대회 발표집, pp. 337-381, 1995.
- [15] Tsai, R. Y. and Lenz, R. K., "Review of the two-stage camera calibration technique plus some new implementation tips and new techniques for center and scale calibration," *Proc. 2nd Topical Mtg. Machine Vision, Opt., Soc. Amer.*, Lake Tahoe, NV, Mar. 18-20, 1987.
- [16] 이정화, 이문규, "악조건하의 카메라 교정을 위한 알고리즘," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 164-175, 1999.
- [17] Jacoby, S. L. S., Kowalik, J. S., and Pizzo, J. T., *Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems*, Prentice-Hall, New-Jersey, U.S.A., 1972.
- [18] Phong, Q. T., Horaud, R., Yassine, A., and Tao, P. D.,

“Object pose from 2-D to 3-D point and line correspondences,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 15, no. 3, pp. 225-243, 1995.

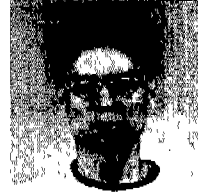
[19] 이형근, 이문규, “머신비전 기반의 엔진 마운트 부품 자동 공급시스템,” *한국정밀공학회지*, vol. 18, no. 5, pp. 177-185 (2001).



이 문 규

1957년 1월 8일생. 현재 계명대학교 기계·자동차공학부 교수로 재직중이다. 서울대학교 산업공학과에서 공학사(1979). 한국과학기술원에서 공학석사(1981). 공학박사(1989). 학위를 취득하였고, 미국 Rutgers

대학 산업공학과에서 객원교수(1991-3)로 있었다. 주요 관심분야는 machine vision, 신경망, 물류시스템 등.



안 택 진

1973년 10월 4일생. 상주대학교 전자전기공학과에서 공학사(1999). 계명대학교 산업공학과에서 공학석사(2001) 학위를 취득하였고, 주요 관심분야는 machine vision, camera calibration 등.