

GMDH 알고리즘을 이용한 정확한 카메라의 보정기법

Accurate Camera Calibration Using GMDH Algorithm

김명환*, 도용태**
 (Myounghwan Kim *, Yongtae Do **)

Abstract - Camera calibration is an important problem to determine the relationship between 3D real world and 2D camera image. The existing calibration methods can be classified into linear and non-linear models. The linear methods are simple and robust against noise, but the accuracy expectation is generally poor. In comparison, if the non-linearity, which is due mainly to lens distortion, is corrected, the accuracy can be better. However, as the optical features of lens are diverse, no non-linear method can be always effective for diverse vision systems. In this paper, we propose a new approach to correct the calibration error of a linear method using GMDH algorithm. The proposed technique is simple in concept and showed improved accuracy in various cases.

Key Words : Camera calibration, Lens distortion, GMDH

1. 서론

카메라 보정(calibration)은 카메라의 위치, 방향을 결정하는 외부(extrinsic) 계수와 초점 거리, 영상 면에서의 광학적 중심, 렌즈의 왜곡 계수 같은 내부(intrinsic) 계수를 결정하는 과정이다. 이러한 과정은 3차원 실세계 좌표계에서 정의되는 제어점들(control points)과 이들에 대응되는 2차원 영상점들 사이의 관계를 사용하여 수행된다. 카메라 보정의 정확성에 영향을 미치는 여러 요소들 중 중요한 하나는 렌즈의 왜곡인데, 이는 비선형적인 특성을 가지고 있으며, 크게 방사형 왜곡(radial distortion)과 비방사형 왜곡(non-radial distortion)으로 분류된다. 기계시각 분야에서의 카메라 보정은 여러 가지 기법들이 있지만, 카메라의 위치, 방향만을 고려하는 선형 기법[1]과 렌즈의 왜곡까지도 고려한 비선형 기법[2,3]으로 나눌 수 있다. 선형 기법은 간단하고 잡음에 강한 장점이 있지만, 렌즈의 왜곡을 무시하므로 계측의 정확성이 높지 않을 수 있다는 단점이 있다. 비선형 기법은 일반적으로 잡음에 약한 대신 정확도가 높다고 알려져 있으나, 가정된 모델과 실제상황이 맞지 않은 경우 선형 기법보다 결과가 오히려 나빠진다는 사실이 보고된 바 있다[4]. 본 논문에서는 GMDH(Group Method of Data Handling) 알고리즘[5]으로 선형 카메라 보정 기법의 정확도를 개선하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 선형 기법의 결과에 GMDH를 적용하여 렌즈의 왜곡 등에 의한 비선형성을 학습에 의해 모델링한다. 제안된 기법은 모의 실험에서 기존에 기법들 보다 다양한 상황에서 좋은 결과를 보였다.

2. 카메라 보정기법

2.1 선형 모델

선형 모델을 이용한 카메라 보정은 실세계에서 정의 되는 3차원 점이 바늘구멍(pin-hole)으로 대표되는 렌즈를 중심으로 2차원 영상에 대응된다는 그림1과 같은 바늘구멍 카메라 모델을 기본으로 한다. 즉, 실세계 좌표계(W)내의 점 $P(x, y, z)$ 로부터 변환된 카메라 좌표계(C)에서의 점 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 와 이에 대응 되는 영상 좌표들 (u, v) 라고 하고 초점거리를 f , 영상 면에서의 광학적 중심을 (u_0, v_0) 라고 했을 때, 다음과 같은 식이 주어진다.

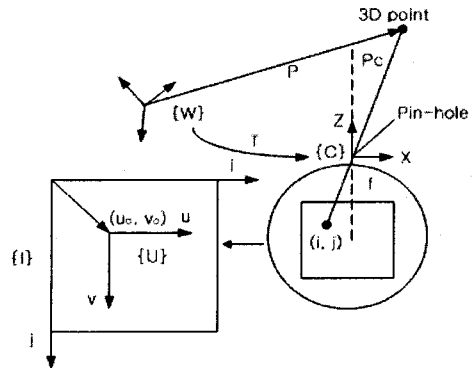


그림 1. 바늘구멍 카메라 모델에 의한 3차원 점의 투영변환
 Fig 1. Projection of a 3D point by the pin-hole camera model

저자 소개

* 大邱大學 情報通信工學科 碩士課程

**大邱大學 電子情報工學部 教授 · 工博

$$u = -f \frac{x_c}{z_c} \quad v = -f \frac{y_c}{z_c} \quad (1)$$

$$i = u_0 + u \quad j = v_0 + v \quad (2)$$

점 P와 P_c는 동차변환에 의해 아래와 같이 관계되어지고

$$P_c = TP \quad (3)$$

미지의 카메라 파라미터 ($m_{ab} | a=1,2,3, b=1,2,3,4$) 는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$i = \frac{m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \quad (4-1)$$

$$j = \frac{m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}} \quad (4-2)$$

2.2 비선형 모델

앞에서 기술한 선형기법은 간단하고 빠른 장점이 있지만, 비선형성이 무시되면서 카메라 보정의 정확성이 떨어지는 문제가 있다. Tsai[2]는 비선형성의 주요 원인을 렌즈의 방사형 왜곡(radial-distortion)으로 보고, 식(5)과 같이 근사화 하였다.

$$i_U = i_D + D_i \quad j_U = j_D + D_j \quad (5)$$

단, (i_U, j_U)는 왜곡이 없는 이상적인 점, (i_D, j_D)는 왜곡된 영상점이며 $r_D = \sqrt{i_D^2 + j_D^2}$ 는 광학적 중심에서 영상 점까지의 거리, $k_a, a=1,2,\dots$, 는 방사형 왜곡 계수를 나타낸다.

$$D_i = i_D(k_1 r_D^2 + k_2 r_D^4 + \dots) \approx i_D k_1 r_D^2 \quad (6-1)$$

$$D_j = j_D(k_1 r_D^2 + k_2 r_D^4 + \dots) \approx j_D k_1 r_D^2 \quad (6-2)$$

또한 Weng[3]은 방사형 모델에 비방사형 왜곡까지도 고려한 정교한 모델을 식(7)과 같이 제시 하였다.

$$\frac{r_{11}x + r_{12}y + r_{13}z + t_x}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + t_z} = i_D + (g_1 + g_3) i_D^2 + (7-1)$$

$$g_4 i_D j_D + g_1 j_D^2 + k_1 i_D (i_D^2 + j_D^2)$$

$$\frac{r_{21}x + r_{22}y + r_{23}z + t_y}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + t_z} = j_D + g_2 i_D^2 + g_3 i_D j_D + (7-2)$$

$$(g_2 + g_4) j_D^2 + k_1 j_D (i_D^2 + j_D^2)$$

여기서, g_1, g_2, g_3, g_4, k_1 는 왜곡 계수들이며, $r_{ab} | a=1,2,3, b=1,2,3, t_x, t_y, t_z$ 는 동차변환 T의 요소이다.

3. GMDH 알고리즘을 이용한 정확도 개선

Ivakhnenko에 의해서 제안된 GMDH(Group Method of Data Handling)알고리즘[5]은 데이터로부터 최선의 모델을 다항식으로 도출하는 자기조직화 모형화 방법이다. 본 논문에서는 GMDH 알고리즘을 그림2와 같이 카메라 보정의 문제에 4가지 구조로 적용하여 보았다.

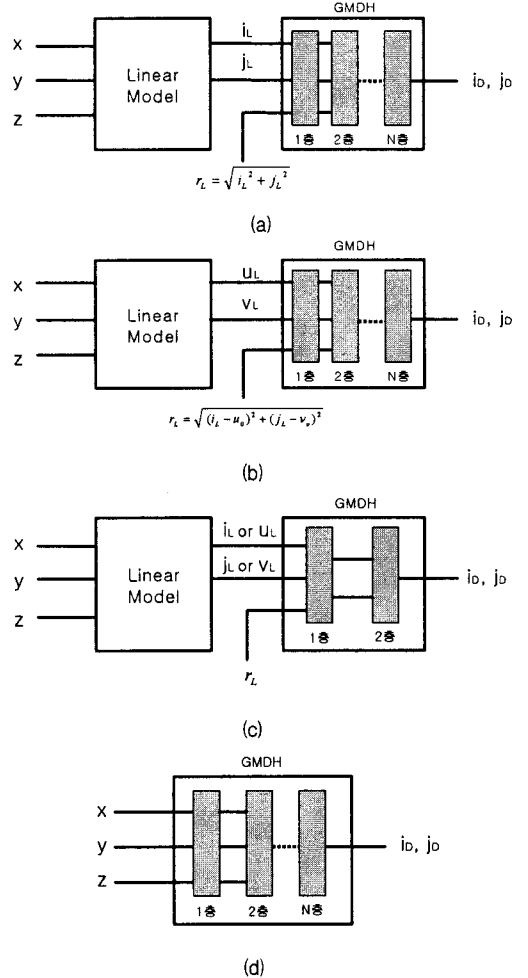


그림 2. 카메라 보정을 위해 제안된 GMDH 구조
Fig. 2. GMDH structures for camera calibration

그림2.(a)는 렌즈의 광학 중심을 모르는 경우로 선형모델의 출력을 GMDH의 학습을 통해 실제 영상점인 i_D 와 j_D 로 변환하는 구조이다. i_L, j_L, r_L 을 각각 x_1, x_2, x_3 로, i_D 혹은 j_D 를 원하는 출력으로 두면, 알고리즘은 다음과 같이 요약 될 수 있다.

[단계1]: N 개의 입출력 데이터 ($x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, y_i$), $i=1,2,\dots,N$ 을 각각 학습용 (N_1 개), 평가용 데이터 (N_2 개)로 분할한다.

[단계2]: 3개의 입력 변수들 가운데서 임의의 두 개의 입력 변수 x_g, x_h 를 선택하고 가능한 세 가지 쌍에 대하여 식(8)

과 같은 2변수 2차식의 부분표현식을 구성한다.

[단계3]: 최소자승법에 의해, 학습 데이터를 이용하여 식(8)의 계수 a_0, a_1, \dots, a_5 를 추정한다.

[단계4]: 계수 a_0, a_1, \dots, a_5 를 추정한 식에 평가용 데이터를 대입하여 세 가지 입력 쌍에 대한 각각의 오차 평균 E_1, E_2, E_3 를 계산한다.

[단계5]: 단계 4에서 얻어진 E 중 가장 작은 값이 전 단계 오차의 최소치보다 크면 알고리즘을 종료한다.

[단계6]: 단계5를 만족하지 않는 경우, 현재 3개의 출력 z_1, z_2, z_3 로 새로운 입력 데이터를 구성하고, 단계2로 되돌아가므로서 새로운 층을 형성한다.

$$z_k = a_0 + a_1x_g + a_2x_h + a_3x_g^2 + a_4x_h^2 + a_5x_gx_h \quad (8)$$

단, $k=1, 2, 3$

그림2.(b)는 (a)의 구조와 달리 광학 중심을 알고 있는 경우로 그 학습법은 동일하다. 그림2.(c)는 GMDH 학습 1층의 결과 중 오차가 가장 큰 회귀식을 도태시켜 나머지 2개의 층만으로 다음 층의 GMDH를 구성하는 구조이고, (d) 구조는 선형모델 없이 3차원 점 $P(x, y, z)$ 가 GMDH만으로 영상값을 얻고자 하는 경우이다.

4. 실험의 결과

제안된 기법이 어떤 성능을 보이는지 모의 실험을 통하여 살펴보고, 그 결과는 표1과 같다. 정규분포의 불규칙 잡음이 평균1[pixel]의 오차를 가지고, 방사형 왜곡 계수 $k_1 = 0.001584$, 비방사형 왜곡 계수 $g_1 = -0.0002$, $g_2 = 0$, $g_3 = 0.0002$, $g_4 = -0.0002$ 인 데이터를 가정하였다. 400개의 데이터가 모의적으로 만들어져 사용되었고, 200개는 학습에, 나머지 200개는 시험에 사용되었다.

표 1. 성능의 비교 결과 (단위: 픽셀)

Table 1. Comparative results of performance (unit: pixel)

구분	학습오차	시험오차
선형기법	1.4511	1.4731
구조 (a)	1.4472	1.4615
구조 (b)	1.2434	1.3987
구조 (c)	1.6568	1.5092
구조 (d)	2.1687	7.2252

표에서 알 수 있듯이 제안한 구조 중 렌즈의 광학적인 중심을 알고 있는 경우를 가정한 구조(b)는 가장 좋은 정확도를 보였고, 선형 모델을 생략한 구조(d)는 가장 나쁜 결과를 보였다. 기존의 기법들 중 널리 사용되는 Tsai기법[2]과 GMDH 구조(b)의 비교결과는 그림3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 기법은 Tsai기법에 비해, 불규칙 잡음, 방사형 왜곡, 비방사형 왜곡, 광학중심의 오차가 증가 하는 경우 모두에서 대체로 비슷하거나 좋은 정확도를 보였다.

5. 결론

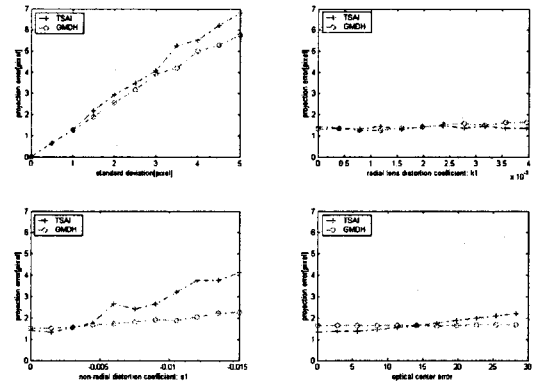


그림 3. 제안된 GMDH구조와 Tsai기법과의 투영오차 비교
Fig 3. Projection error comparison of proposed GMDH structure and Tsai method

카메라 보정을 위한 기법으로 간단한 선형 기법이 있지만, 비선형의 렌즈의 왜곡을 무시하면서 정확도가 떨어지는 문제가 있다. 이에 최근의 연구는 렌즈의 왜곡을 보상하는데 주안점을 두고 있는 경향이 있다. 렌즈의 왜곡을 고려한 비선형기법들 중 널리 사용되고 있는 기존의 Tsai의 기법은 사용된 모델이 가정된 상황에 만족되지 못할 때 오히려 선형 기법보다 정확도가 떨어진다. 본 논문에서는 GMDH 알고리즘을 이용한 기법을 제안함으로써 다양한 상황에서 만족스러운 결과를 얻었다. 제안된 방식은 개념적으로 간단하고, 학습의 속도가 빠르며, 정확도가 높다.

참 고 문 헌

- [1] Y.Yakimovsky and R.Cunningham, "A system for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras," Computer Graphics and Image Processing, Vol.7, pp.195-210, 1978.
- [2] R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE J.Robotics & Automation, Vol.RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [3] J.Weng, P.Cohen, and M.Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, pp.965-980, 1992.
- [4] S.-W.Shih, Y.-P.Hung, and W.-S.Lin, "When should we consider lens distortion in camera calibration," Pattern Recognition, Vol.28, No.3, pp.447-461, 1995.
- [5] Muller, A.G. Ivakhnenko, F.Lemke, "GMDH Algorithm for Complex Systems Modelling", Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol.4, No.4, pp.275-316, 1998