

論文97-34C-10-7

가중치가 부가된 현들을 이용한 원형부품 중심위치의 강건한 추정 (A Robust Center Estimation of the Circular Parts Based on the Weighted Circle Chords)

成孝慶*, 崔興文*

(Hyo-Kyung Sung and Heung-Moon Choi)

요 약

본 논문에서는 연속적으로 구한 가중치가 부가된 현들을 이용하여 원형부품의 중심위치를 강건하게 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 예지의 방향성분이 중심추정에 미치는 오차를 줄이기 위해 원형 테두리에서 분할 각을 점진적으로 변화시키면서 현들을 구하고, 이들이 중심 추정 오차에 미치는 영향에 따라 가중치를 구하였다. 이들 가중치를 부가하여 분할한 현들을 이용하여 중심 추정함으로써 조명방법 및 배경질감 등에 의해 테두리 정보가 부분적으로 소실된 경우에도 원형부품의 중심위치 및 그 반지름의 강건한 추정이 가능하도록 하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 카메라로 입력된 실제 영상에 대하여 실험한 결과 추정된 중심의 위치 및 반지름의 평균 자승오차가 각각 1.85, 2.77로 나타나 제안된 방법이 기존의 방법들에 비하여 중심위치 및 반지름을 강건하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a technique to estimate center positions of the circular parts under noisy condition is presented. The circle chords are segmented from the circle with successively varying angle and weighted to reduce the center estimation errors effected by the orientations of the circle chords. The weighting factors for variable length chords are adaptively determined according to the error contribution of each chord in center estimation. Robust estimation of the center positions of the circular parts are possible even though the edge informations are partially contaminated by the non-uniform lighting or the background textures. Computer simulations for several images which are obtained for same object under real environment by camera, show that the proposed technique yields 1.85 and 2.77 of estimated error-distribution for center position and radius in mean square error, that the proposed has more robust estimation than those of the conventional methods.

I. 서 론

검사·조정용 로봇 매니플레이터의 운행 등과 같이 컴퓨터시각을 이용하는 자동화 시스템 분야에서는 원형 물체 또는 부품들의 중심 및 그 반지름을 추정하는

연구가 많이 이루어지고 있다^[1-2]. 일반적으로 원형 물체의 위치추출에는 다양한 종류의 Hough변환을 많이 이용하고 있다. Wallace^[3]는 정확한 인수추정을 위하여 먼저 Hough변환으로 원의 인수를 추정하고, 추정된 원 또는 곡선의 주위에 설정된 템플릿내의 화소들을 이용하여 인수들을 재추정하였다. 중심 추정후 반지름을 추정하는 2 단계 Hough변환^[4,5]은 원형물체의 반지름을 모를 경우에도 응용이 가능하나, 중심 추정 오차는 테두리에서 구한 예지 방향성분의 영향을 많이 받는다. 물체의 수직 및 수평 절단 현을 사용하

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University)

接受日字:1997年6月12日, 수정완료일:1997年9月24日

는 빠른 Hough변환^[6]은 입력 영상에서 원의 중심을 신속히 찾아내기는 하지만, 원의 궤적을 이루는 화소들, 특히 궤적 상에서 마주보는 화소들이 소실된 경우 추정된 인수에 상당한 오차를 수반한다. 이와 같이 Hough변환은 테두리에서 구한 에지의 방향성분을 중심추정에 이용하므로 잡음의 영향을 많이 받는다. 그리고 누적된 인수분포에서 최종 인수를 추정하기 위한 그침두치의 선택방법에 따라 추정된 중심의 신뢰도가 많은 영향을 받는다. 한편, 잡음 등의 영향으로 원형 물체의 테두리 궤적밖에 존재하는 화소에 의한 오차를 줄이기 위하여 추정된 초기값을 이용하여 반복적으로 인수를 추정하는 방법도 제안되었다^[7-8]. 그러나 전 처리과정에서 부적절한 조명방법 등으로 추출된 물체의 테두리가 왜곡될 수 있을 뿐만 아니라 그 에지의 폭(edge width)이 중심 추정에 오차 요인으로 작용할 수 있다. 즉, 영상 잡음은 에지 위치(radial position) 및 국소적인 에지 방향(local edge orientation)에 변동을 일으켜 중심추정에 오차를 유발시킬 수 있다.

본 논문에서는 에지의 방향성분이 중심추정에 미치는 오차를 줄이기 위하여 가중치를 부가한 현들을 이용하여 원형부품의 중심위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 원형 테두리에서 수평 및 수직 방향을 포함하여 분할 각을 점진적으로 변화시키면서 현들을 구하고 이들이 중심 추정 오차에 미치는 영향에 따라 가중치를 구하였다. 이렇게 가중치를 부여하여 분할된 현들을 이용함으로써 조명방법 및 배경질감 등에 의해 테두리 정보가 부분적으로 소실된 경우에도 원형부품의 중심위치 및 그 반지름 추정이 가능하도록 하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 카메라로 입력된 실제 영상에 대하여 실험하고 추정된 중심위치의 평균자승오차추천에서 기존의 방법들과 비교하였다.

II. 점진적 분할 현들을 이용한 원형부품의 중심 추정

1. 중심 및 반지름 추정

본 연구에서는 에지의 국부 방향정보(local edge orientation information) 대신에 그림 1에서 보는 바와 같이 원형 테두리상의 두 점에 의해 정의되는 현들을 이용하여 중심위치를 추정하였다.

$P_i(r_i, \theta_i)$ 를 극좌표에서 원점에 중심을 둔 원주상의 한 점이라고 할 때, 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 원

의 중심이 (x_0, y_0) 만큼 이동하면 원주상의 한 점 $P_i(r_i, \theta_i)$ 는 $P_i(r'_i, \theta'_i)$ 로 사상된다^[11]. 이 때 r'_i 및 θ'_i 는

$r_i + r_0 \cos(\theta'_i - \phi) < 0$ 이면, $r'_i = -r_i - r_0 \cos(\theta'_i - \phi)$, $\theta'_i = \theta_i + \pi$ 이고,

$r_i + r_0 \cos(\theta'_i - \phi) \geq 0$ 이면, $r'_i = r_i + r_0 \cos(\theta'_i - \phi)$, $\theta'_i = \theta_i$ 이 된다.

여기서 $r_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ 이고, $\phi = \tan^{-1}(y_0/x_0)$ 로 주어진다.

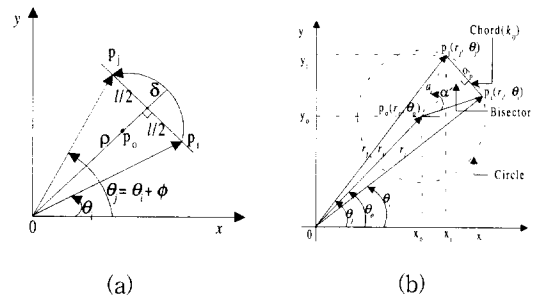


그림 1. (a) 중심 P_0 에 대한 현과 원주상 화소와의 관계 및 (b) 원의 기하학적 구조

Fig. 1. (a) The relation between circle chord and pixel point on the perimeter for center P_0 and (b) the geometry of a circle.

또, 점 $P_j(r_j, \theta_j)$ 가 $P_i(r_i, \theta_i)$ 에서 중심을 기준으로 ϕ 만큼 회전하였다면 $P_j(r_j, \theta_j) = P_i(r_i, \theta_i + \phi)$ 로 주어지며 $P_j(r_j, \theta_j)$ 의 수평 및 수직 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{j(\text{horizontal component})} &= r_i \cos(\theta_i + \phi) \\ &= r_i \cos(\theta_i) \cos(\phi) - r_i \sin(\theta_i) \sin(\phi) \\ P_{j(\text{vertical component})} &= r_i \sin(\theta_i + \phi) \\ &= r_i \cos(\theta_i) \sin(\phi) + r_i \sin(\theta_i) \cos(\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 원주상에 존재하는 임의의 한 점이 주어지면 식 (1)을 이용하여 인접 화소점이 동일한 원주상에 있는지를 검사할 수 있다.

한편, 원의 중심위치는 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 테두리상의 두 점 $P_i(r_i, \theta_i)$ 및 $P_j(r_j, \theta_j)$ 가 이루는 현 k_j 의 가운데 점 o_p 를 지나면서 그 현에 직교하는 법선(perpendicular bisector of the chord)상에 존재한다. 따라서 $P_0(r_0, \theta_0)$ 를 중심으로 하고 그 반지름의 크기가 a 인 원은 원주상의 한 점 $P_i(r_i, \theta_i)$ 에 대한 $\angle OP_0 P_i$ 에 여현정리를 적용하면

$r_o^2 + r_i^2 - 2r_o r_i \cos(\theta_o - \theta_i) = a^2$ 이 되고, $P_i(r_i, \theta_i)$ 에 대한 ΔOP_i 에 여현정리를 적용하면 $r_o^2 + r_i^2 - 2r_o r_i \cos(\theta_o - \theta_i) = a^2$ 이 된다.

현 k_{ij} 의 양 끝점 $P_i(r_i, \theta_i)$ 및 $P_j(r_j, \theta_j)$ 는 동일한 원주 상에 존재하므로 현의 중심을 지나는 법선과 원의 중심사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} r_o^2 - r_j^2 &= 2r_j r_o \cos(\theta_o - \theta_j) - 2r_j r_o \cos(\theta_o - \theta_j) \\ &= 2r_o \cos \theta_o \{r_i \cos \theta_i - r_j \cos \theta_j\} + 2r_o \sin \theta_o \{r_i \sin \theta_i - r_j \sin \theta_j\} \end{aligned} \quad (2)$$

이때, n 개의 화소로 이루어진 테두리상에서 독립적으로 정의될 수 있는 현의 수, N 은

$$N = nCr|_{r=2} = \frac{n!}{(n-r)!r!} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3)$$

로 주어진다.

X_k 를 현들의 수평 성분인 $2(r_i \cdot \cos \theta_i - r_j \cdot \cos \theta_j)$, Y_k 를 현들의 수직 성분인 $2(r_i \cdot \sin \theta_i - r_j \cdot \sin \theta_j)$ 및 R_k 를 현의 길이성분인 $r_i^2 - r_j^2$ 로 정의하면, n 개의 점으로 이루어진 원에서 정의되는 N 개의 현들에 의해 식 (2)와 같이 정의되는 원은 다음과 같이 행렬형태로 바꿀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} w_1 X_1 & w_1 Y_1 \\ w_2 X_2 & w_2 Y_2 \\ \vdots & \vdots \\ w_d X_d & w_d Y_d \\ \vdots & \vdots \\ w_N X_N & w_N Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_o \cos \theta_o \\ r_o \sin \theta_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 R_1 \\ w_2 R_2 \\ \vdots \\ w_d R_d \\ \vdots \\ w_N R_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$A \quad O \quad R$

여기서, w_d 는 오차분석을 통하여 결정되어야 할 d 번째 가중치(weighting factor)이며, 행렬 A 는 $n(n-1)/2$ 개의 가중치가 부가된 현들의 수평 및 수직 성분을 나타내는 $N \times 2$ 벡터이며, 행렬 O 는 원의 중심을 나타내는 $N \times 1$ 벡터 그리고 행렬 R 은 가중치가 부가된 원점에서 현간의 거리성분을 나타내는 $N \times 1$ 벡터를 각각 나타낸다.

그러나, 식 (4)에 정의된 계수 행렬 A 와 R 은 정방 행렬이 아니므로 직접 역함수를 구할 수 없으므로 Moore-penrose pseudo left inverse^[11]를 사용하여 $r_o \cos \theta_o$ (x_o) 및 $r_o \sin \theta_o$ (y_o)를 구한다.

$$O = A^{-L}R \quad (5)$$

여기서, A^{-L} 은 정방행렬이 아닌 A 의 의사 역행렬로

$(A^T A)^{-1} A^T$ 이다.

한편, 그림 2에서 현의 길이는 $l(k_{ij}) = 2a \sin(\alpha_k/2) = [r_i^2 - r_j^2]^{1/2}$ 로 주어지므로 식(2)를 만족하는 원의 반지름 a 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n(n-1)/2} \frac{l(k_{ij})}{\sin(\alpha_k/2)} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n(n-1)/2} \frac{\sqrt{r_i^2 - r_j^2}}{\sin(\alpha_k/2)} \quad (6')$$

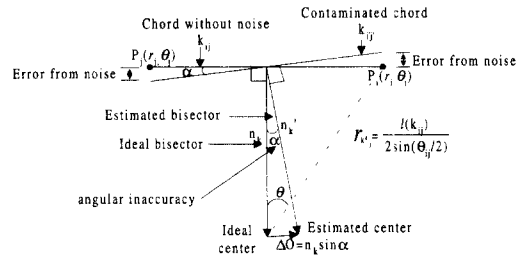


그림 2. 영상 잡음에 의한 중심위치 변동
Fig. 2. Center position error induced by noise.

2. 오차 분석을 통한 가중치 계산

영상 잡음이 에지의 위치 추출에 미치는 영향은 미미하다라도 Hough 변환을 이용한 중심추정에 많이 이용하는 에지의 방향정보에는 충분히 부정적인 영향을 미칠 수 있다^[9-10]. 또한 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 잡음에 의한 방향 변화는 에지보다는 현에 그 영향이 미약하게 나타나며, 짧은 길이의 현보다는 길이가 긴 현이 상대적으로 적은 영향을 받는다.

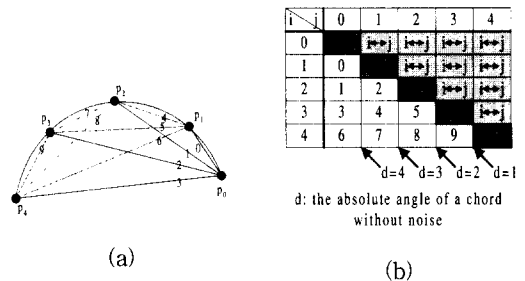


그림 3. 현 k_{ij} 의 배치(a) 및 그 정의 (b)
Fig. 3. Example of (a) the location of the independent circle chords k_{ij} , and (b) their definition.

그림 3 (a) 및 (b)는 테두리상에서 독립적으로 정의될 수 있는 현들의 배치 및 그 정의 예를 나타낸 것이며, 그림 3(b)의 음영 영역은 정의된 현들의 시작위치 P_i 및 끝 위치 P_j 가 동일한 경우이거나 시작 화소와 끝 화소의 위치가 뒤바뀐 경우($P_i \leftrightarrow P_j$)를 나타낸

다. 그림 3(b)에서 알 수 있는 바와 같이 현, k_{ij} 는 시작 위치 및 끝 위치에 따라 다음과 같은 일정한 규칙을 가지고 있다.

$$k_{ij} = f(i) + j$$

$$= \left\{ \frac{i(i-1)}{2} + j \right\}_{|i>j} \quad (7)$$

여기서, $f(i)$ 는 그림 3(b)의 현에 대한 정의 행렬의 첫 번째 열에 대한 계차수열(differential progression)을 나타낸다. 따라서 그림 3(b)를 현의 길이, d 별로 재배치하면 다음과 같다.

$$j = i - d$$

$$k_{ij}^d = \frac{i^2 + i - 2d}{2}_{|i>j} \quad (8)$$

여기서 k_{ij}^d 는 원주상의 점 P_i 와 P_j 를 지나면서 그 길이가 d 인 현을 의미하며, $n-d$ 개의 독립적인 현이 존재한다. 이 때 편각(angle of the circle cord)은 $(\theta_i - \theta_j)_{|i>j}$ 이다.

그림 2에서, 현 k_{ij}^d 와 잡음에 의한 길이 및 방향 변동으로 잘못 측정된 현 $k_{i'j'}^d$ 가 이루는 각도, α 에 대해서 중심위치의 변동 ΔO_k 는 다음과 같다.

$$[\Delta O_{k_d}]^2 \approx [\sin \alpha_{k_d} \cdot r_{k_d}]^2$$

$$= \frac{r_{k_d}^2 - \{l(k_{ij}^d)/2\}^2}{l(k_{ij}^d)^2} \quad (9)$$

식에서 알 수 있는 바와 같이, 현들의 편각이 가변하여 현의 길이가 1 화소 크기로 줄어들면 오차는 거의 원의 반지름 r 에 선형적으로 비례하며, 현의 길이가 추출하려는 원의 지름에 접근함에 따라 중심 추정 오차는 0에 접근적으로 수렴한다. 따라서 중심위치 오차 ΔO 를 근거로 짧은 길이의 현들은 중심위치 계산에 적게 반영시키고, 길이가 긴 현들은 많이 반영시킴으로써 중심추정오차를 감소시켜 잡음에 강건한 중심위치 추정을 행할 수 있다. 즉, 현들이 잡음에 오염되어 중심 추정에 부적절한 영향을 줄 수 있기 때문에 동일한 길이를 갖는 현들의 오차 분산을 구하고, 이를 바탕으로 가중치를 구하였다.

길이가 d 인 현들이 중심추정에 미치는 오차의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_{\alpha_d} = \frac{1}{n-d} \sum_{i=b}^{n-d-1} \Delta O_i^2 = b_d^2 \quad (10)$$

여기서, b 는 오차의 평균 $\frac{1}{n-d} \sum_{i=b}^{n-d-1} \Delta O_i$ 이다.

길이가 d 인 현들 중 k_{ij}^d 번째 현의 가중치는 다음과 같이 정의한다.

$$w_{k_d} = \alpha_{k_d} \cdot \frac{1}{\sigma_{\alpha_d} + 1} \quad (11)$$

식 (11)에서 알 수 있는 바와 같이 적절한 조명과 기타 잡음이 없이 환경하에서 추출된 현들은 α_{k_d} 에 비례하여 중심추정에 반영되며, 길이가 짧거나 잡음에 의해 많이 오염된 현들은 중심추정에 대한 기여도는 감소한다. 즉, 제안한 추정방법에서는 상대적으로 잡음에 민감하게 반응하는 길이가 짧은 현들보다는 길이가 길거나 잡음에 오염되지 않은 현들이 중심 추정에 더 큰 영향을 미치도록 하였다. 식 (11)에서 α_{k_d} 는 실험적으로 정하며 제안한 방법에 대한 실험에서는 2로 하였다.

III. 실험고찰

영상잡음이 존재하는 환경에서 추정된 중심위치의 강건성을 평가하기 위하여 그림 4와 같이 300×300 크기의 영역에 임의의 중심위치에 대하여 반지름의 크기를 30-50화소범위에서 Bresenham알고리즘을 이용하여 발생시켰다. 이렇게 발생시킨 원들을 분산이 2인 가우시안 잡음을 첨가하여 실험한 결과를 평균자승오차(mean square error: MSE)측면에서 표 1, 그림 5 및 그림 6에 나타내었다. 그림 4의 원내의 번호는 원들을 무작위로 발생시킬 때 그 순서를 나타낸다.

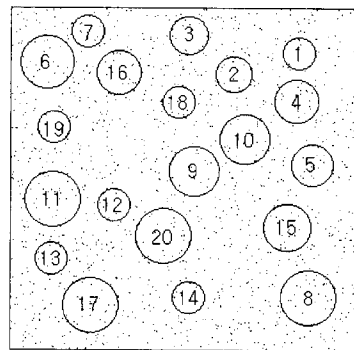


그림 4. 실험에 사용된 가우시안 잡음이 첨가된 원들 (분산=2)

Fig. 4. Generated circles with Gaussian noise in experiment(variance=2).

표 1. 각 알고리즘별 평균 중심위치 및 평균 반지름의 자승 오차

Table 1. MSE for estimated center position and radius of each algorithms.

	Centeriod	Hough	Landau	Proposed	
				#1	#2
Δo	2.07	6.73	2.99	1.86	1.39
Δr	3.11	6.12	3.26	2.42	1.80

표 1에서 #1은 분할 현들에 가중치를 부가하지 않고 인수 추정을 행한 경우이며, #2는 분할 현에 가중치를 부가하여 인수를 추정한 결과이다. 그림 4와 같이 무작위로 발생시켜 잡음을 첨가한 원들에 대한 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 가중치를 부가한 인수 추정결과가 실제 중심위치에 대하여 MSE측면에서 1.39 축소, 반지름의 크기는 1.80 축소정도의 오차 분포를 나타내어 기존의 방법보다 분할 현을 이용하여 중심을 추정하는 것이 유리하며, 또한 가중치를 부가한 경우가 더 우수한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그림 5는 추정된 중심에서 실제 중심을 뺀 중심 추정 오차를, 그리고 그림 6은 추정된 반지름 크기에서 실제 반지름을 뺀 반지름 추정 오차를 축소단위로 도시하였다.

그림 5 및 6에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 방법이 무게 중심법이나 및 Hough 방법보다 잡음에 강건하게 중심위치 및 반지름을 추정함을 알 수 있으며, 반지름의 크기가 작은 경우보다 큰 경우에 더 정확한 중심추정 결과를 얻을 수 있었다.

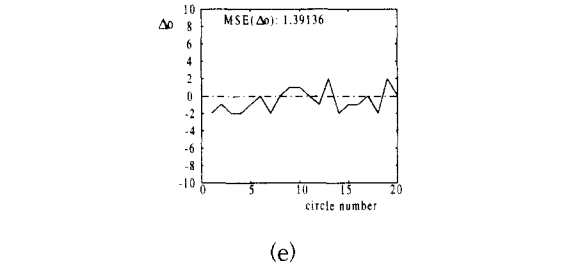
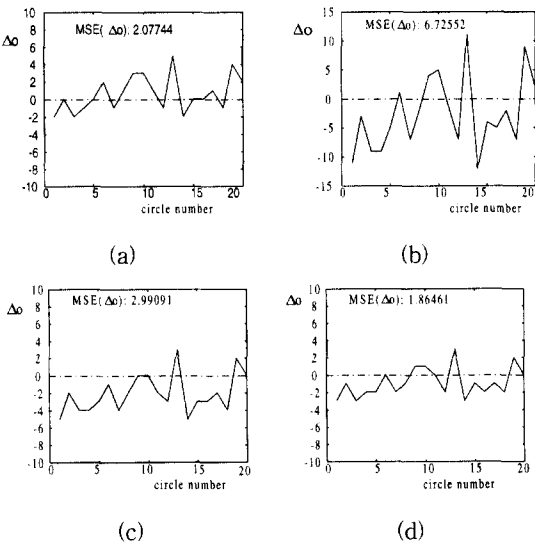


그림 5. 추정된 위치의 오차분포. (a) 무게 중심법, (b) Hough 변환, (c) Landau 방법, (d) 가중치를 고려 않은 제안된 방법 (e) 가중치를 고려한 제안된 방법

Fig. 5. Distribution of position error. (a) centeriod, (b) Hough transform, (c) Landau's method, (d) proposed method without weighting, (e) proposed method with weighting.

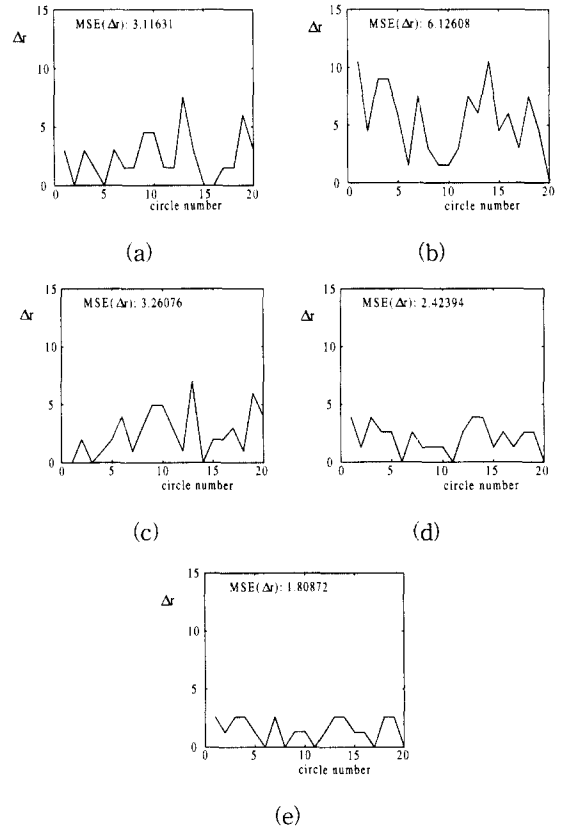


그림 6. 계산된 반지름 오차분포 (a) 무게 중심법, (b) Hough 변환, (c) Landau방법, (d) 가중치를 고려하지 않은 방법 그리고 (e) 가중치를 고려한 방법

Fig. 6. Distribution of radius error: (a) centeriod, (b) Hough transform, (c) Landau's method, (d) proposed method without weighting, and (d) proposed method with weighting.

부적절한 조명이나 기타 잡음에 의하여 원형 테두리의 일부 정보가 소실될 경우에 대한 추정능력을 확인하기 위하여 중심을 $(x_c, y_c)=(0, 0)$, 반지름을 30 화소로 하고, 첨가되는 잡음의 분산을 2로 하여 호의 크기에 대한 중심 추정의 강건성을 호의 내각 θ 에 대하여 실험하였다.

호의 내각을 2π 에서 0으로 감소시키면서 실험하고 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 이 때 오차는 추정된 값에서 실제값을 뺀 값으로 하였다.

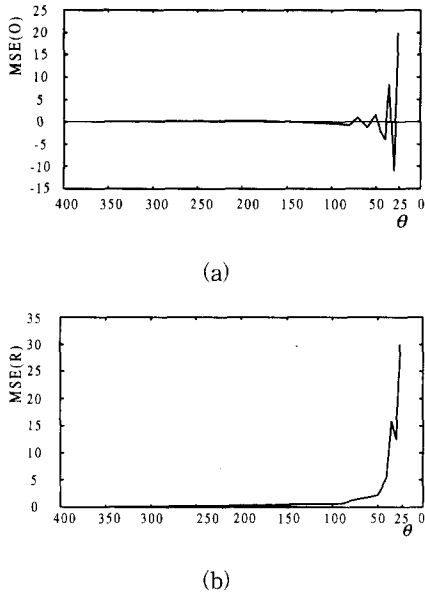


그림 7. 여러 내각을 가지는 호에 대해 추정된 (a) 중심 및 (b) 반지름의 MSE분포
Fig. 7. Distributions of the MSE for (a) the estimated center and (b) the estimated radius for arc with various arc angles.

그림 7에서 보인 바와 같이 제안된 알고리즘의 추정오차는 반지름 대 호의 내각비가 0.01이 되는 약 30° 근처에서 급격하게 증가한다. 따라서 반지름 대 호의 내각비가 0.02가 되는 60° 이상일 때 중심위치 및 반지름 추정오차가 실제 값에 대하여 2 화소 크기 이내의 오차를 나타내었다.

제안된 방법을 PCB에 실장된 원형부품의 중심위치를 추정하는데 이용하기 위하여 그림 8과 같이 CS-3330카메라를 사용하고 PCB로 부터 수직으로 65mm 거리에서 256 명암도(gray level)와 분해능 0.038mm/pixel인 180×180 크기의 영상을 획득하여 실험에 이용하였다.

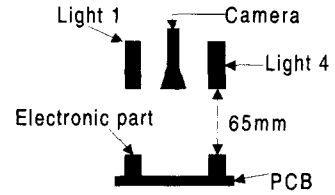


그림 8. 실험 환경
Fig. 8. Condition for experiment.

그림 9의(a),(b),(c),(d) 및 (e)는 부품 표면의 조도를 각각 30, 15, 5, 3, 그리고 2 lux로 가변하여 얻은 영상이며, (f), (g) 및 (h)는 렌즈의 초점이 맞지 않을 때, 그리고 (i) 및 (j)는 각각 동서남북 방향의 4개의 조명중 한쪽 조명이 없을 때, (k)는 두 쪽 조명이 없을 때, 그리고 (l)은 세 개의 조명이 없는 환경하에서 획득한 영상이다.

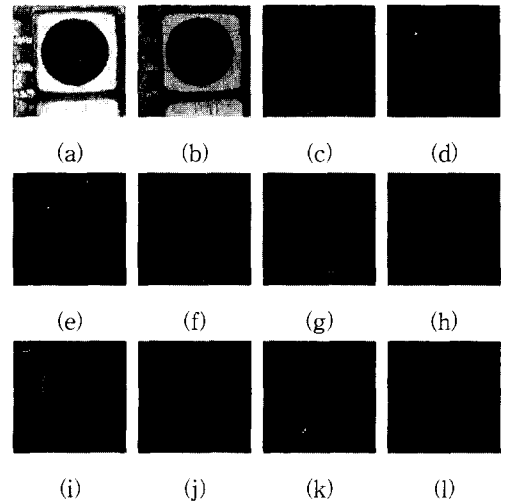


그림 9. 실험에 사용된 대표적인 영상, (a), (b), (c), (d), 및 (e)는 조명을 가변 시켰을 때, (g) 및 (h)는 초점이 맞지 않을 때, 그리고 (i) 및 (j)는 조명 하나가, (k)는 두 개가, (h)는 조명 세 개가 없을 때 획득한 영상들

Fig. 9. Image examples for the experiment. (a), (b), (c), (d), and (e) are images for varying lighting, (g) and (h) are the defocused image, and (i), (j) are the images at one light failure, (k) is at two-light failure, and (l) is at three-light failure.

중심 추정을 위하여 입력된 256 명암도 영상을 p_tile 방법 과 LoG연산자를 사용하여 부품의 테두리를 추출하였다. 그림 9에 도시된 영상에 대하여 제안된 방법으로 중심위치 및 반지름 추정 실험을 하고 그

결과를 표 2에 나타내었다. 표에서 제안된 방법 1과 방법 2는 각각 분할 현에 가중치를 부가하지 않은 경우와 부가하여 실험한 결과이다.

표 2. 각 알고리즘별 중심위치 및 반지름의 평균 자승 오차

Table 2. Mean square error of the center and the radius for each algorithm.

	Centeriod	Hough	Landau	Proposed	
				#1	#2
Δo	6.72	5.59	4.25	3.61	1.85
Δr	8.44	5.82	6.35	5.43	2.77

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 실제 영상에 대한 실험에서도 임의로 발생시킨 실험결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있으며 기존의 방법에 비하여 조명 또는 초점 불량인 카메라로 획득된 영상에 대해서도 추정오차를 거의 나타내지 않았다. 그림 10은 그림 9에 도시된 영상들에 대하여 제안된 방법으로 중심위치 및 반지름을 추정한 결과이다.

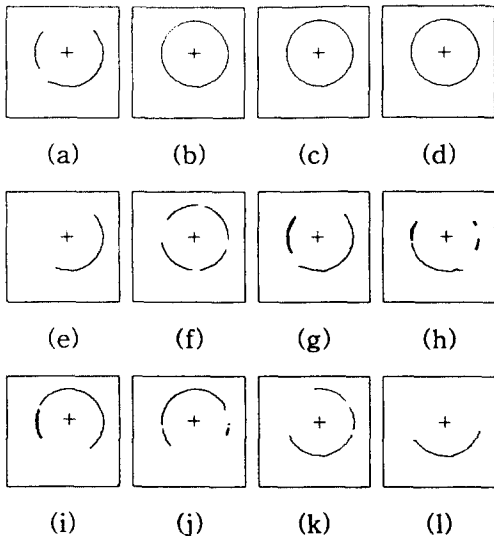


그림 10. 그림 9의 PCB영상으로부터 추출된 테두리 및 중심위치
Fig. 10. Extracted boundaries and the centers from the PCB images of the Fig. 9.

실험결과 조명의 밝기에 의한 오차보다는 조명이 비추는 방향이 편중될 때 중심위치 추정 오차가 많이 나타났으며, 반지름 오차는 렌즈의 초점이 맞지 않을 때와 조명의 밝기가 너무 밝을 때 많이 발생하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 산업 현장에서 획득될 수 있는 원형 부품이 실장된 PCB 영상에서 원형부품의 중심위치를 가중치가 부가된 현들을 이용하여 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 인위적으로 발생시켜 잡음을 첨가한 원에 대해 실험한 결과 및 여러 가지 환경에서 획득한 동일한 원형부품 영상들에 대하여 실험하여 본 결과, 제안된 방법이 기존의 방법들에 비하여 에지에 존재하는 잡음에 비교적 둔감함을 알 수 있었으며, 부분적으로 정보가 소실되더라도 원형 테두리의 반지름 대호의 내각비가 약 0.02 이상이면 2 화소 이내의 오차로 중심위치 및 반지름을 추정할 수 있었다. PCB에 장착된 원형부품에 대한 중심위치 및 반지름의 추정 오차 분포는 MSE로 각각 1.85 화소 및 2.77화소 정도로 기존 방법보다 적은 오차를 나타내었다. 따라서 제안된 방법은 PCB상에 실장된 원형 부품의 조정에 있어서 조명이 부적절하거나 잡음 등이 존재하는 경우에도 강건하게 중심위치를 추출할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Moganti, and F. Ercal, "Automatic PCB inspection algorithms: A survey," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 63, no. 2, pp. 287-313, Nov. 1995.
- [2] C. Kimme, D. H. Ballard, and J. Sklanski, "Finding circles by an array of accumulators," *Communication of ACM* vol. 18, no. 2, pp. 120-122, Feb. 1975.
- [3] A. M. Wallace, "Grayscale image processing for industrial applications," *Image Vision Computing*, vol 1, no. 4 pp. 178-188, Dec. 1983.
- [4] J. Illingworth and J. Kittler, "The adaptive Hough transform," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 9, no. 5, pp. 690-697, 1987.
- [5] E. R. Davies, "A modified Hough scheme for general circle location," *Pattern Recognition Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 37-43, Jan. 1988.
- [6] E. R. Davies, "A High speed algorithm for

- circular object location," *Pattern Recognition Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 323-333, 1987.
- [7] U. M. Landau, "Estimation of a circular arc center and its radius," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 38, no. 3, pp. 317-326, June 1987.
- [8] S. H. Peckinpaugh and R. J. Holyer, "Circle detection for extracting eddy size and position from satellite imagery of the ocean," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 2, pp. 267-273, March 1994.
- [9] S. D. Shapiro, "Feature space transforms for curve detection," *Pattern Recognition*, vol. 10, pp. 129-143, 1978.
- [10] B. B. Chaudhuri and P. Kundu, "Optimum fit circular fit data to weighted data in multidimensional space," *Pattern Recognition Letters*, vol. 14, pp. 1-6, 1993.
- [11] G. Fuller and D. Tarwater, *Analytic Geometry: 7th Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1992.

 저 자 소 개

成 孝 慶(正會員) 第 34卷 C編 第 1號 參照

현재 경북대 대학원 전자공학과 박사
과정 재학중. 주관심분야는 신경망,
병렬처리 등임

崔 興 文(正會員) 第 34卷 C編 第 1號 參照

현재 경북대 전자·전기공학부 교수.
주관심분야는 병렬처리, 신경망 및
그 응용 등임