

증분원변환 이론 및 이차원 물체의 자세인식에의 응용

(Incremental Circle Transform Theory and Its Application for
Orientation Detection of Two-Dimensional Objects)

劉 允 材*, 李 熙 暎**, 卞 增 男***

(Bum Jae You, Hi Young Lee, and Zeung Nam Bien)

要 約

본 논문에서는 이차원 평면위에 놓인 물체의 경계선을 효과적으로 기술할 수 있는 증분원변환을 새롭게 제안하고, 선적분과 유사변환을 도입하여 자동조립공정에 적용할 수 있도록 고속으로 물체의 자세를 추출할 수 있는 영상처리 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제안된 알고리즘은 물체의 위치 및 물체 경계선을 기술하는 시작점에 무관하게 매우 빠르게 물체의 자세를 결정할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

Abstract

In this paper, there is proposed a novel concept of Incremental Circle Transform which can describe the boundary contour of a two-dimensional object without occlusions. And a pattern recognition algorithm to determine the posture of an object is developed with the aid of line integral and similarity transform. Also, it is confirmed via experiments that the algorithm can find the posture of an object in a very fast manner independent of the starting point for boundary coding and the position of the object.

I. 서 론

공장자동화의 요구가 증가함에 따라 각 제조공장에서는 작업자(인간)를 대신할 수 있는 로봇 매니퓰레이터(robot manipulator)를 도입, 적용함으로써 인간에 비해 작업의 일관성, 작업의 반복성 및 작업속

도의 개선등을 확보하고, 궁극적으로 전체 제조공정의 생산성 향상 및 제품의 질(quality)의 향상을 도모하고 있다. 그러나 로봇을 이용하는 많은 경우 작업공간의 모델링(modelling), 작업공간과 로봇간의 관계기술 및 로봇 프로그래밍을 위한 초기화과정을 필요로 하는 바 로봇의 작업 내용이나 작업환경이 빈번하게 바뀌는 경우 작업자가 매번 간섭하여 변경된 내용을 입력하기 위한 시간이 증가되기때문에 정보의 초기화 작업은 자주 전체공정의 생산성을 감소시키는 원인이 된다. 그에 따라 로봇을 이용한 자동조립시스템의 경우 변화하는 작업환경에 적용할 수 있도록, 투입되는 부품의 모양이나 자세등이 변하여도 스스로 판단하여 작업자의 간섭을 줄이고 부품의 분류(classification), 부품의 위치와 경사도 인식 및 부

*正會員, (주)터보테크 技術研究所 로봇개발실
(TURBO TEK Co.Ltd., Robot Division R & D Center)

**正會員, 韓國電氣通信公社
(Korea Telecom)

***正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electronical Eng., KAIST)

接受日字: 1991년 3월 25일

품의 검사등을 수행할 수 있는 시각시스템을 많이 이용하고 있다.¹⁻³⁾

특히, 반도체 소자용 다이본딩 시스템과 전자손목 시계 소자 조립 시스템에서는 제품의 대량생산을 목적으로 동일한 형태를 갖는 부품의 자세(위치와 경사도)를 고속으로 결정하기 위한 시각처리 능력을 필요로 하고 있다. 제품의 대량생산을 목적으로 이차원 평면위에 놓인 동일한 형태를 갖는 물체의 자세를 효율적으로 결정하기 위한 방법들이 제시되었다.⁴⁻¹¹⁾

Hu⁴⁾는 물체의 관성 중심모멘트를 정의하고 관성 주축 개념을 도입하여 물체의 경사도를 결정하였다. 물체의 전체영상을 조사하여 그 영상좌표를 이용하기 때문에 물체 경계의 잡음에 둔감한 반면 처리시간이 오래 소비되는 단점을 가지고 있다. ⁵⁾에서는 이차원 영상의 물체를 영상공간의 x축, y축 및 y=x 축에 각각 투영시킨 일차원 프로젝션(projection) 정보를 이용하여 ⁶⁾보다 빠른 경사도 결정방법을 제시하였다. 하지만 여러개의 물체가 동시에 존재하는 경우 프로젝션시 물체간의 상호간섭에 의하여 모멘트 값이 잘못 결정될 위험이 있으므로 주의가 필요하다.

[6]에서는 Hotelling 변환에서 물체의 공분산(covariance) 행렬의 두 고유벡터는 서로 직교하고(orthogonal) 상호무관(uncorrelate)하며 물체의 최대분산 방향을 나타낸다는 특성을 이용하였다. 즉, 물체의 평균벡터와 공분산 행렬을 구한 후 공분산 행렬의 고유벡터와 영상평면의 기저벡터(basis vector) 사이의 회전행렬을 분석하여 물체의 경사도를 결정한다.¹⁴⁾와 같이 물체의 전체영상을 이용하므로 잡음에 둔감한 장점이 있지만 공분산 행렬의 고유벡터를 구해야 하기 때문에 경사도 결정을 위한 계산량이 많다는 단점이 있다. Perkins¹⁷⁾는 물체의 경계를 분할하여 근사(approximation)한 직선들과 곡선들의 집합으로 표시하고 저장하고 있던 모델집합과 실제의 집합을 서로 비교함으로써 물체의 자세를 결정하였다. 물체의 경계선이 불연속이거나 물체의 경계에 잡음이 섞여 있어도 영상처리가 가능한 반면 물체의 경계를 직선과 곡선으로 근사하기 위한 전처리과정에서 긴 처리시간이 요구된다.

다음으로 물체의 경계가 소수의 직선으로 구성된 경우 Hough 변환⁸⁾을 이용하여 이차원 영상공간의 물체의 경계를 직선의 기울기와 y축 절편으로 구성되는 파라미터 공간으로 변환한 후 최종적으로 파라미터 공간중에서 변환 빈도가 가장 높은 점의 기울기 정보를 추적함으로써 직선 혹은 물체의 경사도를 인

식할 수 있다. [9]에서는 Hough 변환시 처리시간의 단축을 위해 영상처리 영역을 설정하고 간단한 경계추출과 표본추출(sampling) 방법 및 병렬처리를 도입하여 고속의 전자부품 조립시스템에 적용할 수 있는 경사도 결정 알고리즘을 제시하였다. 이 방법들은 물체의 경계에 영상잡음이나 불연속점이 있어도 변환된 결과가 양호하여 원하는 정보를 매우 효과적으로 추출할 수 있는 반면 정보(경사도 또는 모양)의 인식범위가 넓어지거나 파라미터 공간의 해상도(인식정밀도)가 증가 할수록 구성되는 파라미터 공간의 영역이 커져서 변환 자체는 물론 변환후의 처리시간이 길어지는 단점이 있다.

Ayache와 Faugeras¹⁰⁾는 물체의 경계를 다각형으로 근사하고 물체를 기술할 수 있는 여러가지 특징치들을 물체에 대한 가정(hypothesis)들을 변화시키면서 추출한 후 그 값을 반복적으로 모델특징치들과 비교하여 물체의 자세를 결정하였다. 이 방법은 물체간의 부분적인 겹침(occlusion)에 의하여 경계선이 왜곡되는 경우에도 적용할 수 있고 처리시간의 단축을 위하여 효과적인 프로그램 기술을 사용하였지만 물체경계의 근사를 위한 시간과 함께 반복적으로 적절한 가정을 제시하고 그 가정들을 평가하기 위한 계산 및 처리시간의 부담이 문제점으로 지적되고있다. ¹¹⁾에서는 물체의 경계를 복소함수로 기술한 후 그것을 Fourier 급수로 전개한 후 얻어진 Fourier 계수들을 이용하여 물체의 면적, 물체의 무게중심 또는 모멘트 등과 같은 물체의 기하학적 특징치들을 구하는 방법을 제시함으로써 추출된 이차모멘트 값들에 기초하여 물체의 경사도를 결정할 수 있는 가능성을 보였다. 그러나 Fourier 급수전개시 계산량이 많다는 단점이 있고, 각 특징치를 얻기위한 합산의 구간을 유한하게 할 경우 근사값을 얻게되므로 경사도 결정시 오차의 원인이 될 수 있다.

이상을 정리하면 ¹⁵⁾의 방법은 여러개의 물체가 동시에 존재하는 경우 영상처리에 어려움이 있고 대부분의 방법들이 물체의 경계기술과 그 후의 체계적인 영상처리를 위하여 상당히 많은 계산량을 필요로 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 조립공정의 자동화라는 시각에서 볼 때 많은 계산량은 상대적으로 긴 처리시간 혹은 고속계산을 위한 특수 하드웨어에 대한 필요성을 부각시킴으로써 전체공정의 생산성 저하의 원인이 되는 바 시각시스템을 조립공정에 이용하는 경우 반드시 개선되어야 할 문제로 제시되었다. 이에, 본 논문에서는 물체의 경계를 효과적으로 기술할 수 있는 증분원변환(Incremental Circle Transform)을 새롭게 정의하고 물체의 경사도 인식을 위한 증

분원변환 이론을 개발한 후, 개발된 이론에 기초하여 시각시스템을 갖춘 로봇조립공정에 적용할 수 있는 물체의 자세인식 알고리즘을 제시하고자 한다.

제2절에서 증분원변환의 정의와 증분원변환이 갖는 기본적인 특성들에 대하여 기술하고, 유사변환(similarity transform)을 이용한 물체의 경사도 인식을 위한 이론을 제시한다. 제3절에서는 제안된 이론을 실제 알고리즘으로 구현하여 실험한 결과를 제시하고, 제4절에서 연구에 대한 검토 및 결론에 대해서 기술한다.

II. 증분원변환 이론

영상평면위에 놓인 물체의 경계를 나타내는 단순 폐곡선(simple closed curve)을 C 라 하고 폐곡선 C 는 다음의 매개변수 벡터함수^[12]로 표현된다고 하자.

$$\alpha(t) = (x(t), y(t))^T, 0 \leq t \leq L \quad (1)$$

여기서 L 은 폐곡선 C 의 전체길이를 나타낸다. C 의 시작점인 $\alpha(0)$ 는 C 상에 존재하는 임의의 점이며 매개변수 t 의 증가는 C 상에서 반시계방향으로의 이동을 가리킨다.

1. 증분원변환의 정의 및 특성

상호 겹침이 없는 물체의 경계선을 효율적으로 기술할 수 있는 증분원변환을 다음과 같이 새롭게 정의한다.

[정의 1] 증분원변환(Incremental Circle Transform)

임의의 단순폐곡선 $\alpha(t), 0 \leq t \leq L$ 와 상수 r 이 주어질 때 임의의 $t \in [0, L]$ 에 대하여 열벡터 $\Delta_r \alpha(t)$ 가 다음과 같이 표시된다고 하자.

$$\Delta_r \alpha(t) = (\Delta_r x(t), \Delta_r y(t))^T \quad (2)$$

여기서

$$\Delta_r x^2(t) + \Delta_r y^2(t) = r^2 \quad (3)$$

이고, 임의의 $\Delta t \in [0, L]$ 에 대해

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta_r \alpha(t) \quad (4)$$

이다. 이때 $\Delta_r \alpha(t), 0 \leq t \leq L$ 을 $\alpha(t), 0 \leq t \leq L$ 의 증분원변환이라고 정의한다.

(식3)과 (식4)를 만족하는 Δt 가 여러개 존재하는 경우 Δt 의 유일성(uniqueness)을 확보하기 위하여 최소의 Δt 를 선택하여 점 $\alpha(t)$ 에서의 증분을 결정한다. 그러면 증분원변환은 $x-y$ 평면상의 폐곡선 C 에 포함된 모든 점들을 $\Delta x-\Delta y$ 평면상의 (식3)으로 표현

되는 반경이 r 인 증분원상으로 변환한다. 이때 반경 r 은 임의로 선택가능한 것으로서 인식결과에 영향을 미치지않음을 제3절에서 실험으로 보였다.

그림1(a)와 같이 $x-y$ 평면상의 임의의 폐 곡선 C 와 C 상의 한 점 $\alpha(t)$ 를 생각하자. 이 때 점 $\alpha(t)$ 를 중심으로 반경이 r 인 증분원을 그리면 점 $\alpha(t)$ 의 반시계방향에서 생기는 C 와 증분원간의 교점 $\alpha(t+\Delta t)$ 부터 중심 $\alpha(t)$ 까지의 증분을 계산할 수 있다. 그 결과 점 $\alpha(t)$ 가 그림1(b)와 같이 $\Delta x-\Delta y$ 평면의 증

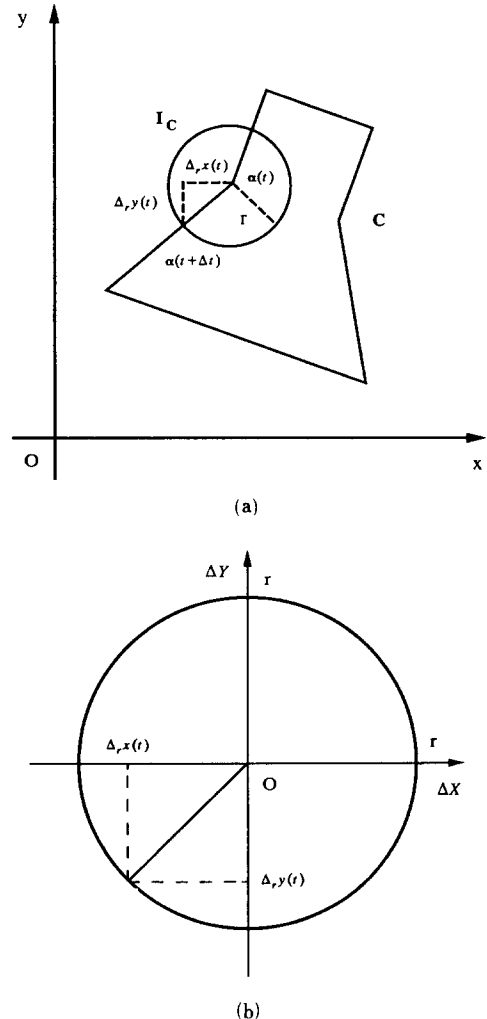


그림 1. 증분원 변환의 정의
 (a) 영상평면상의 폐곡선과 증분원
 (b) $\Delta x-\Delta y$ 평면상의 증분원
Fig. 1. Definition of incremental transform.
 (a) Simple closed curve in $x-y$ plane and an incremental circle,
 (b) Incremental circle in $\Delta x-\Delta y$ plane.

분원상의 점 $(\Delta_r x(t), \Delta_r y(t))$ 로 변환된다. 따라서 $\alpha(t), 0 \leq t \leq L$ 의 증분원변환 $\Delta_r \alpha(t), 0 \leq t \leq L$ 은 반경이 r 인 증분원을 폐곡선 C 상의 임의의 시작점 $\alpha(0)$ 에서 출발하여 반시계방향으로 연속적으로 움직이면서 모든 경계점에서 증분을 결정함으로써 구할 수 있다. 이 때 증분원의 반경 r 은 단순폐곡선 C 와 증분원간의 교점이 반드시 존재한다는 가정하에서 선택되는 바 다음의 식을 만족하는 반경을 유효반경(feasible radius)이라 한다.

$$C \cap I_c \neq \emptyset, t \in [0, L]$$

증분원변환의 예로써 그림2의 직사각형 및 원의 경우를 알아보자. 반경이 10화소인 증분원을 이용하고 그림에 표시된 $\alpha(0)$ 로부터 시작하여 한 주기의 증분원변환을 그리면 그림2(b)와 그림2(d)로 각각 나타난다. 특히, 사각형의 각 변에서는 일정한 $(\Delta_r x(t), \Delta_r y(t))$ 값을 가지므로 증분값이 동일한 네 구간이 나타난다.

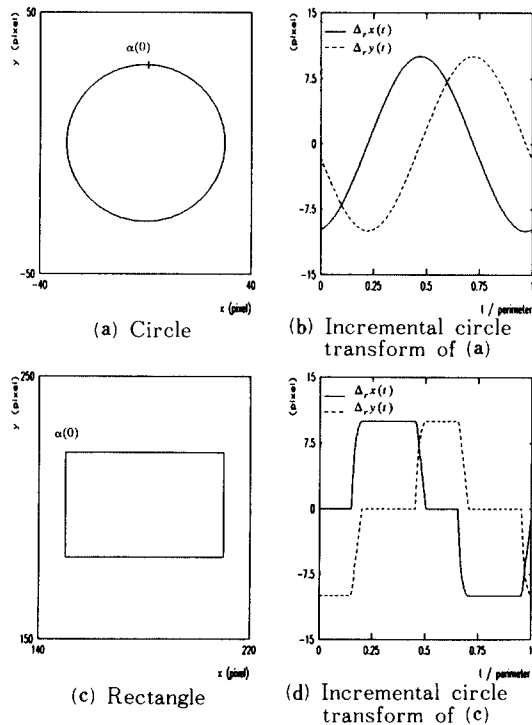


그림 2. 증분원변환의 예
Fig. 2. Examples of incremental circle transform.

2. 증분원변환의 기본특성

이상에서 정의된 증분원변환의 유효한 특성들을

고찰하기 위하여 그림 3의 폐곡선 C 와 그의 평행이동 및 회전이동된 폐곡선들을 나타내는 각 단순폐곡선을 다음과 같이 표시하였다.

$$\begin{aligned} C &: \alpha(t), 0 \leq t \leq L \\ C_A &: \alpha_A(t), 0 \leq t \leq L \\ C_B &: \alpha_B(t), 0 \leq t \leq L \\ C_{RT} &: \alpha_{RT}(t), 0 \leq t \leq L \end{aligned}$$

이 때 단순폐곡선간의 관계를 균질변환(homogeneous transform)⁽¹³⁾으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_{\alpha_A(t)} = \begin{bmatrix} d_A(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{CA} \\ 0 & 1 & y_{CA} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ 1 \end{bmatrix} = H_A \cdot H_{\alpha(t)}$$

$$H_{\alpha_B(t)} = \begin{bmatrix} \alpha_B(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{CB} \\ 0 & 1 & y_{CB} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ 1 \end{bmatrix} = H_B \cdot H_{\alpha(t)}$$

$$\begin{aligned} H_{\alpha_{RT}(t)} = \begin{bmatrix} \alpha_{RT}(t) \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_A(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= H_R \cdot H_{\alpha_A(t)} \end{aligned}$$

여기서

$(x_{CA}, y_{CA})^T$: C_A 의 중심

$(x_{CB}, y_{CB})^T$: C_B 의 중심

θ : $(x_{CA}, y_{CA})^T$ 를 중심으로 반시계방향으로 회전한 각도이다. 이 때 임의의 폐곡선과 평행이동된 폐곡선의 시작점은 간단한 균질변환에 의하여 일치될 수 있으므로 증분원변환은 다음의 성질을 갖는다.

[보조정리 1] 평행이동에 대한 불변성(Translation Invariance)

임의의 폐곡선과 그의 평행이동된 폐곡선의 시작점이 일치하면 두 폐곡선의 증분원변환들은 동일하다.

증명)

주어진 유효반경 r 에 대하여

$$H_{\Delta_r \alpha_A(t)} = \begin{bmatrix} \Delta_r \alpha_A(t) \\ 1 \end{bmatrix}; H_{\Delta_r \alpha(t)} = \begin{bmatrix} \Delta_r \alpha(t) \\ 1 \end{bmatrix}$$

이라하자. 이 때 폐곡선 C 와 C_A 에 대하여

$$\begin{aligned} &H_{\Delta_r \alpha_A(t)} - H_{\Delta_r \alpha(t)} \\ &= H_{\alpha_A(t+\Delta t)} - H_{\alpha_A(t)} - H_{\alpha(t+\Delta t)} + H_{\alpha(t)} \\ &= H_A \cdot (H_{\alpha(t+\Delta t)} - H_{\alpha(t)}) - (H_{\alpha(t+\Delta t)} - H_{\alpha(t)}) \\ &= (H_A - I) \cdot (H_{\alpha(t+\Delta t)} - H_{\alpha(t)}) \\ &= 0. \end{aligned}$$

여기서 H_A 는 폐곡선 C_A 와 C 사이의 관계를 표현하는 균질변환이다. (증명-끝)

이 보조정리는 그림3의 폐곡선들 C, C_A 와 C_B 의 시작점들이 서로 일치하면 $\Delta_r \alpha(t) = \Delta_r \alpha_A(t) = \Delta_r \alpha_B(t), 0 \leq t \leq L$ 이 성립함을 의미한다.

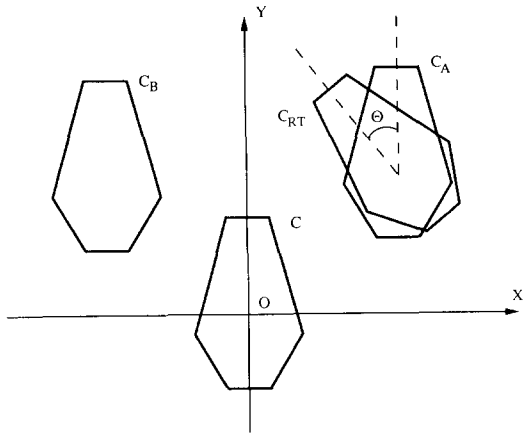


그림 3. 영상평면상의 폐곡선들
Fig. 3. Several contours in x-y image plane.

그리고 (보조정리 1)과 x-y 평면위에 존재하는 임의의 폐곡선은 무게중심을 원점으로 하는 기본도형의 평행 및 회전이동에 의해 표현될 수 있다는 사실에 기초하여 다음의 정리가 성립한다.

[정리 1] 회전행렬 보존성

x-y 평면상의 두 폐곡선간에 균질변환으로 표현되는 회전행렬은 각 폐곡선의 위치에 관계없이 Δx - Δy 평면에서 각 폐곡선의 증분원변환사이에 존재하는 회전행렬과 동일하다.

증명)

그림3의 폐곡선 C_{RT} 와 C_A 상의 서로 일치하는 두 점을 $\alpha_{RT}(t)$ 와 $\alpha_A(t)$ 라 하면 다음의 식이 성립한다.

$$\alpha_{RT}(t) = R \cdot \alpha_A(t) \tag{5}$$

여기서

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

이다. 또한 다른 일치점들인

$$\begin{aligned} \alpha_{RT}(t+\Delta t) &= \alpha_{RT}(t) + \Delta_r \alpha_{RT}(t) \\ \alpha_A(t+\Delta t) &= \alpha_A(t) + \Delta_r \alpha_A(t) \end{aligned}$$

에 대해서도 다음의 관계가 성립한다.

$$\alpha_{RT}(t+\Delta t) = R \cdot \alpha_A(t+\Delta t) \tag{7}$$

따라서 식7에서 식5를 빼면

$$\begin{aligned} \Delta_r \alpha_{RT}(t) &= \alpha_{RT}(t+\Delta t) - \alpha_{RT}(t) \\ &= R \cdot [\alpha_A(t+\Delta t) - \alpha_A(t)] \\ &= R \cdot \Delta_r \alpha_A(t) \end{aligned}$$

이 된다. 그리고 (보조정리1)에서 $\Delta_r \alpha_A(t) = \Delta_r \alpha(t)$ 이므로

$$\Delta_r \alpha_{RT}(t) = R \cdot \Delta_r \alpha(t) \tag{8}$$

이 성립한다. (증명-끝)

임의의 폐곡선이 무게중심에 대하여 점대칭이면 두 대칭점에서의 증분들은 그림4와 같이 그 크기는 같고 부호는 반대가 되므로 다음의 보조정리가 성립한다.

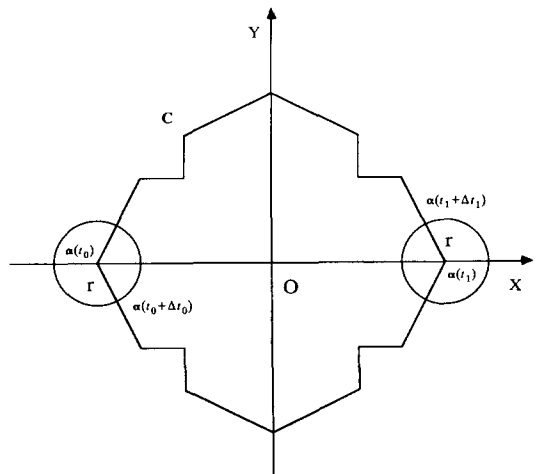


그림 4. 증분원과 점대칭인 폐곡선
Fig. 4. Incremental circle and a contour being symmetric with respect to its center of mass.

[보조정리 2] 증분원변환의 닫힘성 (Closedness)

무게중심에 대하여 점대칭인 폐곡선에 대한 증분원변환의 선적분은 0이다.

그림4의 폐곡선 C를 이용하면 보조정리2에 따라 다음의 식이 성립한다.

$$\int_C \Delta_r x(t) dt = \int_C \Delta_r y(t) dt = 0$$

3. 물체의 경사도

물체의 경사도는 x-y 영상평면에 놓인 한 물체의 x-y 영상평면의 기본좌표계에 대한 자세를 의미한다.

임의로 주어진 물체의 한 경계점에 대해 일치하는 기준물체의 경계점을 알면 식8을 이용하여 주어진 물체의 경사도를 결정할 수 있으나 두 경계선간의 일치점을 찾는 일은 쉬운 일이 아니다. 또한 이러한 일치점 선정의 어려움(correspondence problem)을 극복하기 위하여 식8의 양변의 선적분을 이용한다고 해도 (보조정리 2)의 증분원변환의 단합성을 고려하면 식8의 회전행렬 \mathbf{R} 을 구하는 것은 쉽지않다. 그러나 $\mathbf{B}=\mathbf{PAP}^{-1}$ 과 같은 유사변환^[14]은 행렬 \mathbf{A} 의 기저 벡터인 고유벡터를 비특이(nonsingular) 변환행렬 \mathbf{P} 에 의하여 행렬 \mathbf{B} 의 고유벡터로 변환시키므로 두 행렬의 기저벡터사이의 관계기술에 유용하다는 특성을 이용하면 경사도 결정에 매우 유효한 다음의 정리가 성립한다.

[정리 2]

2×2정방행렬을

$$\mathbf{M}(t) = \Delta_r \alpha(t) \cdot \Delta_r \alpha^T(t),$$

$$\mathbf{T}(t) = \Delta_r \alpha_{RT}(t) \cdot \Delta_r \alpha_{RT}^T(t)$$

라 하자. 그러면 행렬 $\mathbf{M}(t)$ 와 $\mathbf{T}(t)$ 는 서로 유사하고(similar)

$$\int_{C_{RT}} \mathbf{T}(t) dt = \mathbf{R} \cdot \int_C \mathbf{M}(t) dt \cdot \mathbf{R}^{-1} \tag{9}$$

를 만족한다. 여기서

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{10}$$

이다.

증명)

식8을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta_r \alpha_{RT}(t) = \mathbf{R} \cdot \Delta_r \alpha(t)$$

이 때

$$\det(\mathbf{R}) = 1$$

이다. 따라서

$$\begin{aligned} \Delta_r \alpha_{RT}(t) \cdot \Delta_r \alpha_{RT}^T(t) &= \mathbf{R} \cdot \Delta_r \alpha(t) \cdot [\mathbf{R} \cdot \Delta_r \alpha(t)]^T \\ &= \mathbf{R} \cdot [\Delta_r \alpha(t) \cdot \Delta_r \alpha^T(t)] \cdot \mathbf{R}^T \\ &= \mathbf{R} \cdot [\Delta_r \alpha(t) \cdot \Delta_r \alpha^T(t)] \cdot \mathbf{R}^{-1} \end{aligned}$$

이 성립한다. 여기서 행렬 $\mathbf{M}(t)$ 와 $\mathbf{T}(t)$ 를 이용하여 정리하면

$$\mathbf{T}(t) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{M}(t) \cdot \mathbf{R}^{-1} \tag{11}$$

이 되어 두 행렬이 서로 유사함을 알 수 있다. 그리고 $\mathbf{T}(t)$ 는 선형변환이므로 식11로부터

$$\int_{C_{RT}} \mathbf{T}(t) dt = \mathbf{R} \cdot \int_C \mathbf{M}(t) dt \cdot \mathbf{R}^{-1}$$

이 성립한다. (증명-끝)

식9에서 $\mathbf{M}(t)$ 와 $\mathbf{T}(t)$ 는 (보조정리 1)에 의하여 평행이동에 대한 불변성을 가지므로 식9는 폐곡선의 위치에 무관하게 성립한다. 또한 식9에서 사용한 선적분은 물체의 경계를 표시하는 각 폐곡선의 시작점의 위치에 상관없이 그 값을 동일하게 결정할 수 있으므로 같은 폐곡선에 대하여 시작점의 변동이 있어도 식9는 유효하다. (식9)에서 $\int_C \mathbf{M}(t) dt$ 와 $\int_{C_{RT}} \mathbf{T}(t) dt$ 를 상술하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_I = \int_C \mathbf{M}(t) dt = \left[\int_C \Delta_r x^2(t) dt \quad \int_C \Delta_r x(t) \Delta_r y(t) dt \right. \\ \left. \int_C \Delta_r x(t) \Delta_r y(t) dt \quad \int_C \Delta_r y^2(t) dt \right]$$

$$\mathbf{T}_I = \int_{C_{RT}} \mathbf{T}(t) dt = \left[\int_{C_{RT}} \Delta_r x_{RT}^2(t) dt \quad \int_{C_{RT}} \Delta_r x_{RT}(t) \Delta_r y_{RT}(t) dt \right. \\ \left. \int_{C_{RT}} \Delta_r x_{RT}(t) \Delta_r y_{RT}(t) dt \quad \int_{C_{RT}} \Delta_r y_{RT}^2(t) dt \right]$$

그리고 위의 기호를 이용하여 (식9)을 다시 쓰면

$$\mathbf{T}_I = \mathbf{R} \cdot \mathbf{M}_I \cdot \mathbf{R}^{-1} \tag{12}$$

이 된다. 여기서 한 행렬의 유사변환은 행렬의 고유벡터(eigenvector)들을 변환하는 특성이 있으므로 다음의 따름 정리가 성립한다.

[따름정리 1] (절대 경사도)

(식12)의 행렬 \mathbf{M}_I 를 대각화하는 회전행렬 \mathbf{R} 은 x-y 영상평면의 기본좌표계에 대한 물체의 자세를 결정한다.

[증명] 회전행렬 \mathbf{R} 에 의한 (식12)의 유사변환은 행렬 \mathbf{R} 을 적절히 선택함으로써 2×2 정방행렬 \mathbf{M}_I 를 대각화 할 수 있다. 이 때 행렬 \mathbf{M}_I 의 고유벡터들은 영상평면의 기저(basis) 벡터인 (1, 0)^T와 (0, 1)^T로 변환된다. 따라서 행렬 \mathbf{R} 은 폐곡선의 고유벡터와 영상평면의 기저 벡터 사이각 정보를 포함한다.

(식12)의 행렬 \mathbf{M}_I 를 대각화하는 회전행렬 \mathbf{R} 은 x-y 영상평면의 기본좌표계에 대한 물체의 자세를 결정한다.

물체의 절대경사도를 결정하기 위하여 행렬의 대각화를 고려하여 식12를 상술하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}^{-1}$$

여기서

$$a = \int_c \Delta_r x^2(t) dt, \quad b = \int_c \Delta_r x(t) \Delta_r y(t) dt,$$

$$c = \int_c \Delta_r y^2(t) dt$$

이고

p, q : 행렬 \mathbf{M}_1 의 고유값(eigenvalue)

이다. 이를 이용하여 물체의 절대 경사도 θ_a 는 다음의 식13과 같이 결정된다.

$$\theta_a = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{2b}{c-a} \right) & \text{if } c < a \\ \frac{1}{2} \cdot (\pi - \tan^{-1} \left(\frac{2b}{c-a} \right)) & \text{if } c > a \text{ and } b \geq 0 \\ \frac{1}{2} \cdot (-\pi - \tan^{-1} \left(\frac{2b}{c-a} \right)) & \text{if } c > a \text{ and } b < 0 \\ \frac{\pi}{4} & \text{if } a = c \text{ and } b > 0 \\ -\frac{\pi}{4} & \text{if } a = c \text{ and } b < 0 \\ \text{undefined} & \text{if } a = c \text{ and } b = 0 \end{cases} \quad (13)$$

III. 실험결과 및 검토

^[15]에서 제안된 산업용 시각장치를 이용하여 실험을 수행한다. 먼저 반복적인 경사도 인식이 수행되기 전 이진영상을 얻기위한 역치선정과 증분원변환을 위한 증분원의 좌표들을 메모리에 저장한다. 역치선정을 위하여 그레이 레벨 영상의 히스토그램을 얻은 후 otsu^[16]가 제안한 분리함수(separability function), 개념을 도입한다. 그리고 그림5(a)의 디지털 증분원의 좌표를 메모리에 저장하는 동시에 경사도 인식시의 계산오차를 줄이기위하여 디지털 원의 각 점에 상응하는 그림5(b)와 같은 실제 원의 좌표도 저장한다. 그 다음 개발된 이론을 이용하여 다음의 알고리즘을 순차적으로 수행한다.

(단계 1) 이진영상을 읽어들인다.

(단계 2) 영상내의 물체들에 대한 8-아웃 체인 코드(chain code)를 만든다.

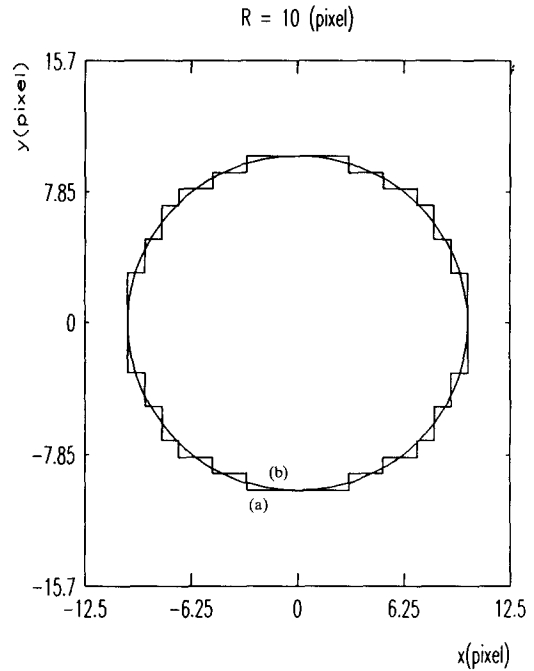


그림 5. 반경이 10화소인 증분원
Fig. 5. Incremental circle whose radius is 10 pixels.

(단계 3) 각 물체의 체인코드를 이용하여 각 경계선에 대한 증분원변환을 수행한다.

(단계 4) 식12의 행렬 \mathbf{M}_1 를 다음과 같이 계산한다.

$$\int_c \Delta_r x^2(t) dt \cong \sum_{k=1}^M w_k \Delta_r x^2(k)$$

$$\int_c \Delta_r y^2(t) dt \cong \sum_{k=1}^M w_k \Delta_r y^2(k)$$

$$\int_c \Delta_r x(t) \Delta_r y(t) dt \cong \sum_{k=1}^M w_k \Delta_r x(k) \Delta_r y(k)$$

$$w_k = \begin{cases} 1, & |x_{k+1} - x_k| + |y_{k+1} - y_k| = 1 \\ \sqrt{2}, & |x_{k+1} - x_k| + |y_{k+1} - y_k| = 2 \end{cases}$$

(x_k, y_k) : 현재의 경계점

(x_{k+1}, y_{k+1}) : 반시계 방향의 이웃한 경계점

\mathbf{M} : 체인코드를 구성하는 화소의 수

(단계 5) 식 13을 이용하여 물체의 경사도를 결정한다.

구현된 알고리즘을 반도체 소자용 다이브딩 시스템^[17]과 전자손목시계 소자 조립시스템^[18]등의 전자부품 자동조립 시스템에서 흔히 볼 수 있는 직사각형

모양의 물체에 대해 적용한다. 그림6의 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 의 경사도를 갖는 직사각형 물체들에 대한 한 주기의 증분원변환 ($\Delta_{rx}(t), \Delta_{ry}(t)$), $0 \leq t \leq L$ 를 그리면 그림7과 같다. 물체의 회전에 따라 증분원변환의 변화를 알 수 있다. 여기서 제안된 알고리즘의 (단계 5)에 의해 결정된 경사도를 관성모멘트를 이용한 방법⁴, Hotelling 변환에 의한 방법⁶, 영상의 프로젝션을 이용한 방법¹¹ 및 인식영역 설정 Hough 변환에 의한 방법¹²등을 이용하여 결정된 경사도와 비교하여 정리하면 표1과 같다. 인식된 경사도의 값을 살펴보면 모두 유사한 결과를 보여준다. 반면에 각 물체에 대한 체인코딩을 완료한 후의 각 방법에 의한 경사도 인식시간을 정리하면 그림8과 같이 나타나 제안된 알고리즘을 이용하는 경우 다른 방법들에 비해 현저하게 인식시간이 단축되었음을 알 수 있다. 제안된 증분원변환을 이용하는 경우 물체의 경계선이 길어질수록 처리시간이 증가하게 되는데 여기서는 물체의 경사도가 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 의 순서로 변화할수록 경계선을 구성하는 화소의 수가 200, 168, 140, 140화소로 감소하기 때문에 처리시간이 점차 감소한다. 그림8에서 각 방법에 대한 평균시간비를 증분원변환에 의한 방법을 기준으로 정리하면 표2와 같다.

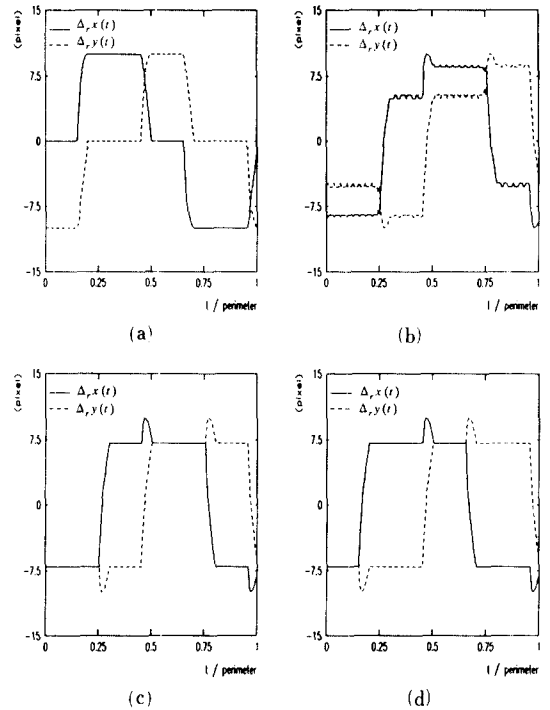


그림 7. 물체집합 I에 대한 증분원변환
Fig. 7. Incremental circle transform of objects set I.

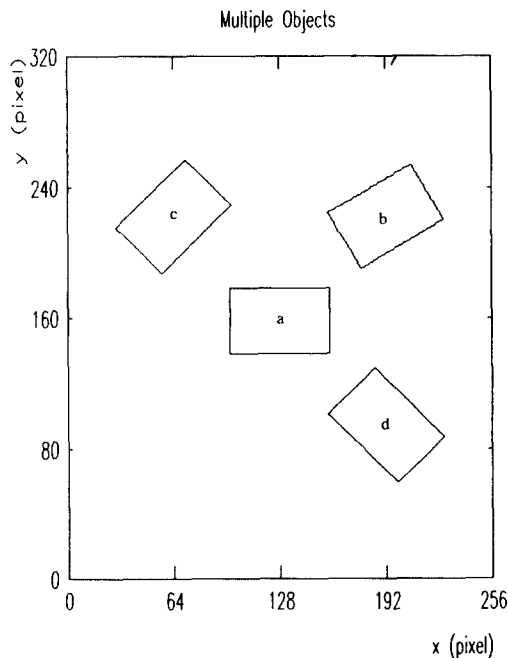


그림 6. 물체집합 I
Fig. 6. Objects set I.

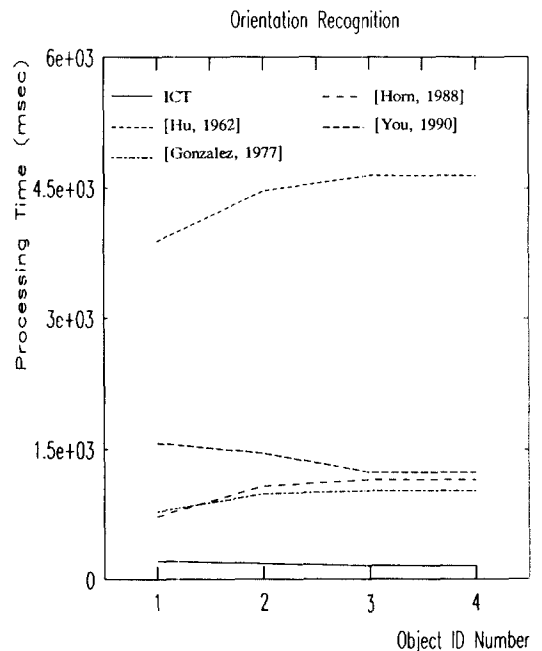


그림 8. 경사도 인식시간의 비교
Fig. 8. Comparison table of orientation recognition time.

표 1. 그림6의 물체에 대한 경사도(단위: θ°)

Table 1. Detected orientations for the objects in Fig. 6(unit: θ°)

물체의 각도	증분원변환 알고리즘	모멘트 [Hu, 1962]	Hotelling변환 [Gonzalez, 1977]	프로젝션 [Horn, 1988]	Hough변환 [You, 1990]
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.0	31.54	31.45	31.45	31.45	31.00
45.0	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
-45.0	-45.00	-45.00	-45.00	-45.00	-45.00

표 2. 경사도 인식을 위한 각 방법간의 시간비

Table 2. Time ratio of orientation detection for several objects.

증분원변환 알고리즘	모멘트 [Hu,1962]	Hotelling변환 [Gonzalez,1977]	프로젝션 [Horn,1988]	Hough변환 [You,1990]
1.0	24.9	5.8	5.4	7.8

다음으로 경사도 인식오차에 대한 영상 양자화(quantization) 해상도 및 증분원 반경의 변화등에 의한 영향을 알아본다. 영상 양자화를 위한 해상도를 증가시키는 효과를 얻기위해 그림9의 경사도 10°, 20°, 30°, 40°를 각각 갖는 물체를 1배, 1.5배, 2배, 2.5배, 3배로 점차 확대하고 크기가 변화하는 각 물체에 대하여 증분원의 반경을 5화소부터 20화소까지 변화시

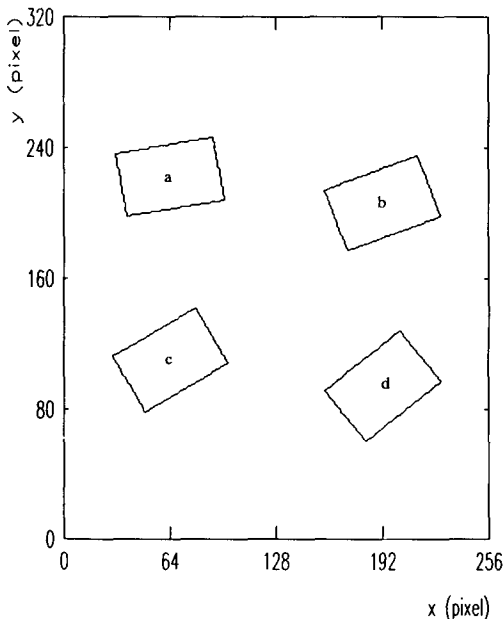
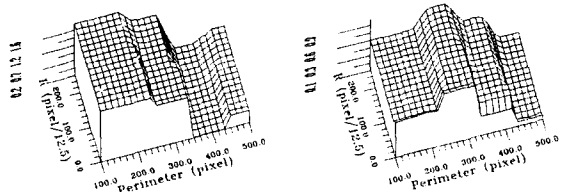
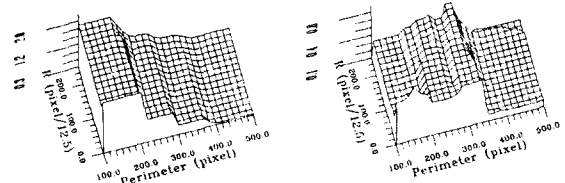


그림 9. 물체집합 II
Fig. 9. Objects set II.



(a) (그림9-a)의 경우 (b) (그림9-b)의 경우



(c) (그림9-c)의 경우 (d) (그림9-d)의 경우

그림 10. 경사도 인식에 대한 증분원의 반경 및 영상해상도의 영향

Fig. 10. Effects on orientation recognition of image resolution and radius of incremental circle.

키면서 추출한 경사도 측정오차는 그림 10의 3차원 그림으로 나타난다. 그림의 x축은 증분원의 반경, y축은 물체둘레의 길이 그리고 z축은 경사도 측정오차의 절대값을 표시한다. 각 물체에 있어서 증분원 반경의 변화에 따른 경사도 측정오차의 분산은 0.6° 이내로써 증분원 반경의 변화는 측정오차에 큰 영향을 미치지 않으며 영상 양자화를 위한 해상도가 증가할수록 측정오차와 그 분산은 감소하여 측정 정확도가 증가함을 알 수 있다.

끝으로 그림11의 물체들에 대하여 제안된 알고리즘을 적용하면 증분원변환은 그림12와 같고, 다른 인식방법들과 비교한 경사도 인식결과와 각 물체에 대한 인식시간은 표 3으로 정리된다. 곡선으로 이루어진 물체의 경우 영상 양자화에 의한 영향이 다각형 물체에 비하여 크게 나타나 경사도 측정값이 다른 방법들과 약간의 차이를 보인다. 그러나 직사각형 물체의 경우처럼 처리시간은 현저히 단축됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

영상평면상의 단순곡선을 효율적으로 표현하고 분석할 수 있는 증분원변환 이론을 제안하고 시각장치와 로봇 매니퓰레이터를 사용한 자동조립공정에서 부품들의 신속한 자세인식을 위한 패턴인식 알고리즘을 개발하였다. 제안된 증분원변환은 물체의 경계선을 등거리 증분벡터를 이용하여 기술하되 영상평

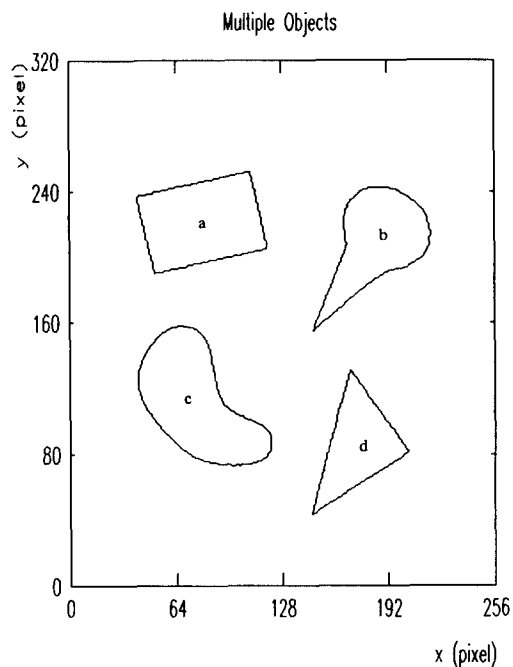


그림 11. 물체집합 III
Fig. 11. Objects set III.

표 3. 그림 11의 물체에 대한 경사도 인식
Table 3. Orientation detection for the objects in Fig. 11.

물체 번호	증분원변환 알고리즘	모멘트 [Hu, 1962]	Hotelling 변환 [Gonzalez, 1977]	프로젝션 [Horn, 1988]
a	12.69	12.21	12.21	12.16
b	50.52	54.41	55.02	54.35
c	-50.73	-52.74	-52.28	-52.79
d	70.44	71.72	71.07	71.74

(a) Detected orientation (unit : θ°)

물체 번호	증분원변환 알고리즘	모멘트 [Hu, 1962]	Hotelling 변환 [Gonzalez, 1977]	프로젝션 [Horn, 1988]
a	277.3	5484.8	1147.1	1101.4
b	261.7	5265.8	1195.4	1289.9
c	270.3	6542.1	1409.9	1416.6
d	247.1	4276.6	993.2	1114.2

(b) Processing time for orientation detection (unit : msec)

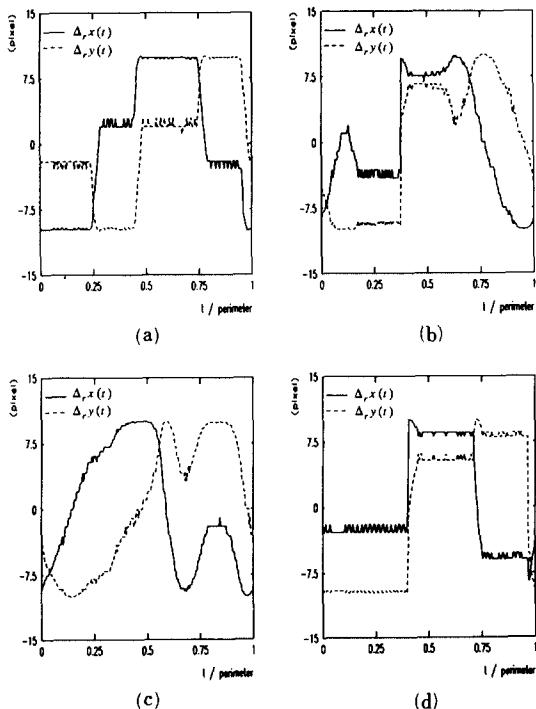


그림 12. 물체집합 III의 증분원변환
Fig. 12. Incremental circle transform of objects set III.

면에서는 간단한 덧셈만을 사용하여 변환이 가능하기 때문에 경계선 기술을 위한 처리시간이 단축되었고, 특히 물체의 경사도 인식을 위하여 유사변환과 선적분을 도입함으로써 삼각함수 및 지수함수등의 초월함수에 대한 계산량을 줄여 전체 영상처리 시간이 감소하였다. 또한 증분원변환이 물체경계의 등거리 증분벡터를 이용하고 선적분을 이용하여 패턴인식이 수행되기 때문에 제안된 알고리즘은 경계선의 점선을 이용하는 경우보다 잡음적응도가 개선되었다.

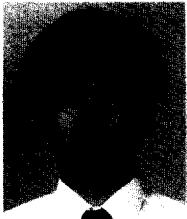
반면에, 보다 유연한 자동조립시스템을 구현하기 위해서는 부품의 자세인식과 함께 신속한 분류가 필요하므로 물체인식을 위한 고속의 영상처리 알고리즘에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- [1] M.P. Groover, *Automation, Production Systems, And Computer Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1987.
- [2] F.G. King and G.V. Puskorius, F. Yuan, R.C. Meier, V. Jeyabalan and L.A. Feldkamp, "Vision Guided Robots for Automated Assembly," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1611-1616, 1988.
- [3] E. Freund and Ch. Buhler, "Intelligent Robotic Systems," *Proceedings of Intern-*

- ational Workshop on Intelligent Motion Control*, vol. 1, pp. SL-1-SL-7, Aug. 1990.
- [4] M. Hu, "Visual Pattern Recognition by Moment Invariants," *IRE Trans. on Information Theory*, pp. 179-187, Feb. 1962.
- [5] B.K. Paul Horn, *Robot Vision*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 46-61, 1988.
- [6] R.C. Gonzalez, P. Wintz, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., California, pp. 122-130, 1977.
- [7] W.A. Perkins, "A Model Based Vision System for Industrial Parts," *IEEE Trans. on Computers*, vol. C-27, pp. 126-143, Feb. 1978.
- [8] J. Sklansky, "On-the Hough Technique for Curve Detection," *IEEE Trans. on Computers*, vol. C-27, no. 10, pp. 923-926, Oct. 1978.
- [9] B.-J. You, Y. Oh, and Z. Bien, "A Vision System for an Automatic Assmibly Machine of Electronic Components," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 349-357, Oct. 1990.
- [10] N. Ayache and O.D. Faugeras, "HYPER: A New Approach for The Recognition and Position of Two-Dimensional Objects," *IEEE Trans. on Paltern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 1, pp. 44-54, Jan. 1986.
- [11] W. Wen and A. Lozzi, "Representing Two Dimensional Object's Geometric Properties using Fourier Coefficients of the Boundary Curve on a Cartesian Plane," *Proceedings of International Conference on Automation, Robotics, and Computer Vision*, pp. 861-865, 1990.
- [12] G.B. Thomas and R.L. Finney, *Calculus and Analytic Geometry* Addison Wesley Publishing Co., Inc., California, 1979.
- [13] J.J. Craig, *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, pp. 15-59, Addison Wesley Publishing Co., Inc., California, 1986.
- [14] C.T. Chen, *Linear System Theory and Design*, CBS College Publishing Co., New York, pp. 6-56, 1984.
- [15] Z. Bien, S.-R. Oh, J. Won, B.-J. You, D.I. Han, and J.O. Kim, "Development of a Well-Structured Industrial Vision System," Presented in 16th *IEEE Industrial Electronics Conference*, Nov. 1990.
- [16] H. Ostu, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histogram," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-9, pp. 62-69, 1979.
- [17] Z. Bien, S.R. Oh, I.H. Suh, J.O. Kim, and Y.S. Oh, "Automatic Assembly for Micro-electronic Components," *IEEE Control System Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 15-19, June 1989.
- [18] Z. Bien, B.-J. You, H. Lee, S.-R. Oh, and Y. Kim, "A New Pattern Recognition Algorithm with Applications to Real-time Assembly Machine fow Two-Dimensional Objects," *Proceedings of International Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision*, pp. 851-855, 1990.

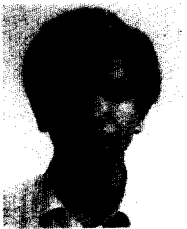
著 者 紹 介



劉 凡 材 (正會員)

1963年 3月 12日生. 1985年 2月 서울대학교 제어계측공학과 학사 학위 취득. 1987年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1991年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과

박사학위 취득. 현재 (주)터보테크 기술연구소 로봇 개발실장. 주 관심분야는 로봇트 비전을 위한 고속 영상처리 하드웨어 및 알고리즘, 로봇의 지능제어 및 조립자동화를 위한 지능제어임.



李 熙 暎 (正會員)

1963年 3月 20日生. 1986年 8月 고려대학교 전기공학과 공학사취득. 1989年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사 학위취득. 1989年~현재 한국전기통신공사 연구개발단 전임연구원. 주

관심분야는 로봇비전, 영상데이터 압축 및 코딩등임.



卞 增 男 (正會員)

1943年 11月 11日生. 1962年 3月 ~1969年 2月 서울대학교 전자공학과 공학사 학위취득. 1972年 Iowa대학 전기과 공학석사 학위취득. 1975年 Iowa대학교 수학과 공학석사 학위 및 동대학 전기과

공학박사 학위취득. 1976年~1977年 Iowa대학 전기과 조교수. 1977年~현재까지 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 1981年~1982年 Iowa대학 전기과 객원부교수. 1987年~1988年 Syracuse 대학교 CASE 연구센터 객원 연구원. 1988年 Tokyo Institute of Technology 객원교수 역임. 주 관심분야는 자동제어이론, 로봇틱스 및 지능시스템 등이며, 현재 한국과학기술원 산업전자기술연구센터(CIET)소장직을 수행중임.