

論文2000-37SD-8-9

일반 타원의 검출을 위한 광학적 Hough변환의 적용 (Application of the Optical Hough Transform for the Detection of a General Ellipse)

朴 祥 國*, 金 成 龍**, 金 秀 重***

(Sang Gug Park, Sung Yong Kim, and Soo Joong Kim)

요 약

본 논문에서는 광학적 Hough변환(HT) 결과로부터 입력영상에 존재하는 타원의 정보를 찾는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 일반화된 타원 수식을 직선에 대한 HT 수식에 대입해서 타원에 대한 포락선 방정식을 구한 후, 포락선의 정보를 이용해 타원을 찾는데 필요한 다섯 개의 변수들을 수식적으로 유도하였다. 제안된 방법을 사용하여 최악의 경우에도 약 94%의 정확도로 타원의 정보를 추출할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인 하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하기 위하여 HT 컴퓨터형성홀로그램(CGH) 필터를 사용하여 광학적 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 광학적HT 결과가 이론적인 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed a new method to find five parameters of an ellipse from the optical Hough transform (HT) results. The method employs the HT for detection of a straight line and the one-dimensional analysis of the resultant parameter domain. Using this algorithm, we simulated about the ellipses with different positions, and obtained the information of the ellipse with 94% accuracy in the worst case. To compare the simulation results with the experimental ones, we performed optical experiments using a HT Computer Generated Hologram (CGH) filter. Through the experiments, we showed that our results were very similar to the simulation results.

I. 서 론

Hough변환(HT)은 잡음이 존재하는 불완전한 입력 영상에 대해서도 전통적인 상관기법을 이용한 방법에

비해서 입력영상에 존재하는 직선, 선분, 원 또는 타원 등을 찾는데 아주 우수한 능력이 있다고 알려져 있다.^[1, 2] 이러한 장점 때문에 HT은 물체추적, 로봇비전, 자동항법시스템 등과 같은 군사적 목적과 의료영상, 지질분석, 문자인식, 생산라인의 품질검사 등과 같은 민간목적에 광범위하게 적용되고 있다. 대부분의 HT은 디지털 컴퓨터에 의해서 처리 되지만 디지털HT은 입력영상이 커질수록 계산량이 많아지고, 이에 따라 과도한 메모리가 요구되고 계산시간이 증대하므로 실시간 처리가 어렵다.^[3] 이러한 어려움을 극복하기 위해서 광학적인 HT을 통한 실시간 처리에 대한 연구가 진행 되고있다. 일반적인 HT^[4]은 변수영역에서 한 점의 세기 값은 입력영역에서 직선의 화소길이(pixel length)를 나타낸다. 하지만 입력영역에서 영

* 正會員, 浦項産業科學研究院

(Research Institute of Industrial Science & Technology)

** 正會員, 威德大學校 컴퓨터工學科

(Dept. of Computer Engineering, Uiduk University)

*** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(Dept. of Electronic and Electric Engineering, Kyungpook National University)

接受日字:2000年3月6日, 수정완료일:2000年7月29日

상에 대한 디지털적인 데이터 처리로 인하여 입력영역에 존재하는 직선의 실제길이(true length)와는 다른 값을 가지므로 디지털 및 광학적인 HT 모두에서 오차가 발생 된다. J. Richards^[5] 및 K. J. Kim^[6] 등은 변수영역에서 정현 곡선들의 기울기로부터, S.G.Park^[7] 등은 광학적 HT결과 얻어진 포락선 정보로부터 입력영역에 존재하는 직선과 타원의 실제길이를 추출하는 방법을 제안 하였다. 한편 정규 변수화 방법에 의해 직선을 검출하기 위한 광학적 HT은 타원과 같은 다차원 도형의 변수들을 찾는 데에도 확대 적용 되었다.^[8,9]

본 논문에서는 광학적 HT 결과로부터 입력영상에 존재하는 타원의 정보를 찾는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 일반화된 타원 수식을 직선에 대한 HT수식에 대입해서 타원에 관한 포락선 방정식을 얻은 후, 포락선에 관한 정보를 이용해서 타원을 찾는 데 필요한 다섯 개의 변수들을 수식적으로 유도 하였다. 제안된 방법을 사용하여 최악의 경우에도 약 94%의 정확도로 타원의 정보를 추출할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인 하였다. 그리고 32×32의 컴퓨터형성홀로그래프(CGH) 배열을 갖는 행렬형태의 HT필터^[10,11] 제작하여 광학적 HT을 실험하였고 이를 시뮬레이션 결과와 비교 하였다.

II. 일반화된 Hough변환

그림 1은 식 (1)에 의해 입력영역에서 정의된 직선의 정규변수화(normal parameterization)를 나타낸 것이다.

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \rho_0 = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 ρ_0 는 직선과 원점 사이의 최단거리 이며, θ_0 는 ρ_0 가 x 축과 이루는 각도이다. 그러므로 변수영역(parameter domain)은 각도-거리 영역(θ, ρ)이다.

이 경우 각각의 푸리에(Fourier) 홀로그램은 (θ, ρ) 영역에서 식 (2)와 같은 대응식에 의해서 하나의 정현곡선을 재생 시킬 것이다.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

여기서 x, y 는 입력영역에서 각 점의 좌표이다.

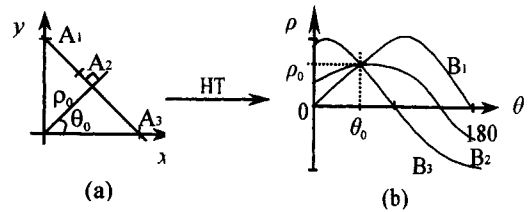


그림 1. 정규 변수화에서 직선에 대한 HT의 원리 : (a) 입력영상 영역 ; (b) 변수영역

Fig. 1. Principle of the Hough transform of a straight line in the normal parameterization : (a) input image plane ; (b) parameter domain plane.

입력영상 $f(x, y)$ 에 대응하는 변수영역에서의 출력 $F(\rho, \theta)$ 는 식 (3)에 의해서 표현된다.

$$F(\rho, \theta) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \times \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (3)$$

여기서 $\delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta)$ 는 HT의 점확산함수(point spread function)를 나타내는 델타 함수이다. 그림 1(a)의 입력영역에서 직선 위에 존재하는 세 개의 점 A_1, A_2, A_3 는 그림1(b)에서 각각 세 개의 정현곡선 B_1, B_2, B_3 로 나타난다. 이들 정현곡선은 하나의 점 (θ_0, ρ_0) 에서 교차하고 θ_0, ρ_0 는 직선 A_1-A_3 의 정규 변수가 된다. 이때 교차점은 변수영역에서 문턱화(thresholding operation)를 적절히 취하면 얻을 수 있다.

III. 일반 타원의 검출

그림 2(a)의 입력영역 (x, y)에 존재하는 타원에 대한 일반적인 방정식은 식 (4)로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + A_x \cos \theta_0 \cos \alpha - A_y \sin \theta_0 \sin \alpha, \\ y &= y_0 + A_x \cos \theta_0 \sin \alpha + A_y \sin \theta_0 \cos \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, A_x, A_y 는 타원의 단축과 장축의 길이정보, x_0, y_0 는 타원의 중심좌표, α 는 변수($0 \leq \alpha \leq 2\pi$), θ_0 는 타원의 단축이 x 축과 이루는 각도 그리고 ρ_0 는 타원의 장축과 원점 사이의 최단거리를 나타낸다. 따라서 $A_x, A_y, x_0, y_0, \theta_0$ 는 타원을 정의하는 다섯 개의 변수가 된다.

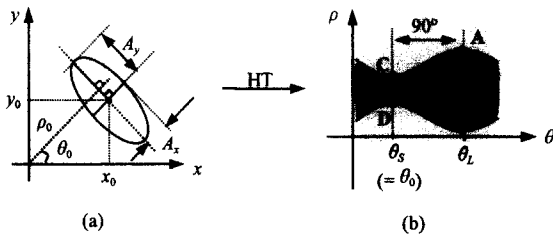


그림 2. 정규 변수화에서 일반타원에 대한 HT의 원리
 Fig. 2. Principle of the Hough transform of a general ellipse in the normal parameter-ization: (a) input image plane; (b) parameter domain plane.

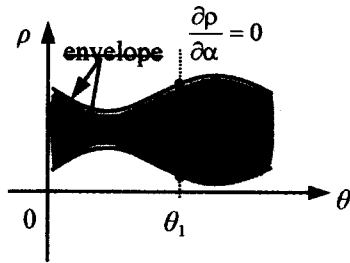


그림 3. (θ, ρ) 영역에서 HT의 포락선
 Fig. 3. The envelopes of the HT in the (θ, ρ) domain.

타원에 대한 방정식 식 (4)를 직선에 대한 HT방정식인 식 (2)에 대입해서 정리하면 타원에 대한 정규화 방정식 식 (5)를 얻는다.

$$\rho = (x_0 + A_x \cos \theta_0 \cos \alpha - A_y \sin \alpha \sin \theta_0) \cos \theta + (y_0 + A_x \cos \theta_0 \sin \alpha - A_y \sin \alpha \sin \theta_0) \sin \theta \quad (5)$$

그러므로 변수영역에서 빛의 세기 분포는 식 (5)에 의해서 정현 곡선들이 중첩된 형태로 나타나고, 이때 각각의 θ 값에 대한 빛의 세기 값들은 α 를 $0 \sim 2\pi$ 까지 변화 시켜 얻을 수 있다. 다음으로 그림 3의 변수영역에서 중첩된 정현 곡선들의 포락선에 대해서 살펴보면, 식 (5)에서 ρ 는 어떤 주어진 곡선 구간들에 대해서 θ 와 α 의 함수이기 때문에 (θ, α) 영역에서 HT의 포락선은 각각의 θ 값에 대해서 α 를 변화 시킴으로써 얻어지는 극점 값에 대응된다. 그러므로 HT의 포락선들은 방정식 $\partial \rho / \partial \alpha = 0$ 으로부터 α 에 관한 관계식을 얻은 후, 이를 식 (5)에 대입해 α 을 소거 시켜 얻을 수 있다.

식 (5)를 미분 방정식 $\partial \rho / \partial \alpha = 0$ 에 대해서 풀고 α 에 대해서 정리하면 식 (6)의 관계식을 얻는다.

$$\tan \alpha = \left(\frac{A_y}{A_x} \right) \tan(\theta - \theta_0) \quad (6)$$

그러므로 변수영역에서 포락선의 최대, 최소를 나타내는 곡선의 방정식은 식 (6)을 식 (5)에 대입해 α 을 소거 시켜 얻을 수 있다.

$$\rho_{envel} = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \pm [A_x^2 \cos^2(\theta - \theta_0) + A_y^2 \sin^2(\theta - \theta_0)]^{1/2} \quad (7)$$

최종적으로 변수영역인 그림 2(b)와 같이 $\theta = \theta_L, \theta_S$ 에서 각각 포락선 위의 점들 A, B, C, D 의 좌표로부터 타원의 다섯 개의 변수들을 결정한다. 여기서 θ_S, θ_L 은 각각 타원의 단축과 장축의 각도를 나타낸다. 기하학적으로 그림 2(a)에서 보는바와 같이 θ_S 는 단축의 각도 θ_0 를 나타내고 장축은 θ_0 로부터 $\pm 90^\circ$ 떨어져 있음을 알 수 있다. 변수영역 그림 2(b)에서 θ_S 는 포락선 사이의 폭이 최소값이 되는 각도로부터 곧바로 얻어지고, θ_L 는 θ_S 로부터 90° 떨어진 지점인 포락선 사이의 폭이 최대값이 되는 각도로부터 곧바로 얻어진다. 그러므로 변수영역에서 각도 θ 가 $\theta_S (= \theta_0)$ 이면 $\theta - \theta_0$ 는 0° 그리고 θ_L 이면 $\theta - \theta_0$ 는 $\pm 90^\circ$ 의 값을 가진다. 이 관계를 식 (7)에 대입하면 각도 θ 가 θ_S 에서 식 (8), 그리고 θ_L 에서 식 (9)를 얻을 수 있다. 여기서 $\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D$ 는 $\theta = \theta_L, \theta_S$ 에서 각각 포락선 위의 점들 A, B, C, D 에서의 좌표 값이 된다.

$$\begin{aligned} \rho_C &= x_0 \cos \theta_S + y_0 \sin \theta_S + A_x, \\ \rho_D &= x_0 \cos \theta_S + y_0 \sin \theta_S - A_x, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_A &= x_0 \cos \theta_L + y_0 \sin \theta_L + A_y, \\ \rho_B &= x_0 \cos \theta_L + y_0 \sin \theta_L - A_y, \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8), (9)를 x_0, y_0 에 대해 연립방정식으로 풀면 다음과 같은 타원의 중심좌표 (x_0, y_0) 에 관한 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\left(\frac{\rho_C + \rho_D}{2} \right) \sin \theta_L - \left(\frac{\rho_A + \rho_B}{2} \right) \sin \theta_S}{\sin(\theta_L - \theta_S)} \\ y_0 &= \frac{\left(\frac{\rho_C + \rho_D}{2} \right) \cos \theta_L - \left(\frac{\rho_A + \rho_B}{2} \right) \cos \theta_S}{\sin(\theta_S - \theta_L)} \end{aligned} \quad (10)$$

마찬가지로, 식 (8), (9)를 단축과 장축의 변수 A_x, A_y 에 관해서 정리하면,

$$A_x = \left(\frac{\rho_C - \rho_D}{2} \right) \quad A_y = \left(\frac{\rho_A - \rho_B}{2} \right) \quad (11)$$

여기서 A_x, A_y 는 각각 단축 및 장축 길이의 1/2이고, 포락선의 최소폭 과 최대폭의 1/2이다.

이상에서와 같이 타원의 다섯 개의 변수는 HT결과로부터 얻어지는 정현 곡선들에 의해 형성되는 포락선의 최대폭 과 최소폭 지점의 각도와 그 각에서의 ρ 값의 최대, 최소값을 구함에 의해서 간단히 얻어질 수 있다.

IV. 시뮬레이션

제안된 방법을 검증하기 위해서 32×32 입력영상에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 해 보았다. 시뮬레이션은 타원의 장축이 x 축과 평행한 경우($\theta_0 = 90^\circ$)인 경우와 45° 경사진 경우($\theta_0 = 45^\circ$) 그리고 이들 각각이 타원의 장축 방향으로 평행이동과 동시에 타원의 크기가 확대된 경우에 대해서 각각 실시 하였다. 앞의 두 경우의 영상을 기준영상(reference image), 후단의 두 경우의 영상을 이동 확대영상(shifted-scaled image)이라 칭한다. 기준영상과 이동 확대 영상에서의 타원의 크기 (단축길이, 장축길이)는 각각 (6,12), (8,16)이고, 중심좌표 (x_0, y_0)는 θ_0 가 90° 인 경우 각각 (-1,7), (4, 7)이고, θ_0 가 45° 인 경우 각각 (6, 8), (9, 3)이다.

그림 4에 이들 각각의 타원에 대한 시뮬레이션 결과를 도시 하였다. 그림 4(a)에서 위의 두 입력은 기준 영상을 그리고 아래 두개의 입력은 이동 확대 영상을 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 각각에 대한 디지털 HT 결과를 도시한 것이다. 그림 4(b)의 첫번째와 세 번째 결과로부터 $\theta_0(=\theta_S)$ 는 90° , θ_L 는 0° 임을 알 수 있고, 두 번째 와 네 번째 결과로부터 $\theta_0(=\theta_S)$ 는 45° , θ_L 는 135° 임을 직관적으로 알 수 있다. 첫번째와 두 번째, 그리고 세 번째와 네 번째의 결과는 동일한 크기의 타원에 관한 HT결과이며 두 결과에 대한 그래프 상의 스케일을 동일하게 적용하면 각각에 대한 포락선의 폭은 동일한 값을 가짐을 알 수 있다.

따라서 각각의 각도에서 A, B, C, D점의 좌표를 얻을 수 있고 이로부터 타원을 구성하는 다섯 개의 변

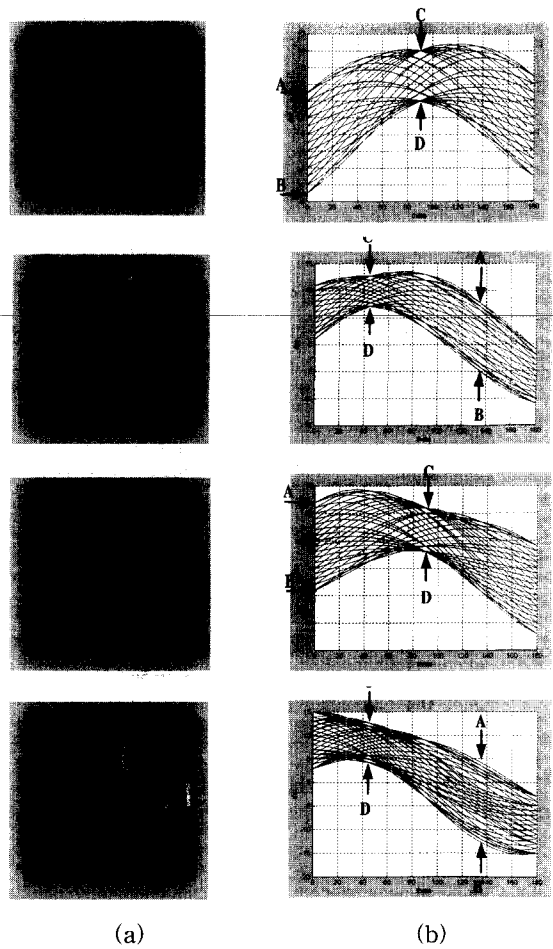


그림 4. 타원에 대한 시뮬레이션 결과: (a) 입력영상: (b) HT결과

Fig. 4. Simulation results of the ellipses: (a) input images; (b) HT results.

수를 찾을 수 있다. 그림 4(a)에서 보느바 와 같이 본 논문에서는 45° 회전된 타원에 대한 입력영상을 얻는 과정에서 디지털 영상처리의 특성상 타원의 원래의 모형에서 변형이 발생하였다. 이는 본 논문의 서론에서 언급하였듯이 직선과 타원의 실제길이와 화소길이 사이에 오차가 발생하는 요인으로 작용하게 된다. 본 논문의 목적상 동일한 타원에 대해서 비교하기 위해서는 처음 부터 45° 회전된 타원에 대해서 레이저 스캐닝이나 CCD 카메라를 통해서 영상을 획득하면 이러한 오차들이 다소 줄어들 것으로 예상된다.

표 1에 이들 시뮬레이션 결과를 요약하였다. 타원의 단축이 x 축과 이루는 각도 θ_0 가 $45^\circ, 90^\circ$ 인 경우로 분리하였고 이들 각각에 대해 기준영상과 이동 확대

영상을 비교하였다. 비교는 타원의 중심점 (x_0, y_0) 와 장축 및 단축의 길이에 대해 원래의 값(original)과 시물레이션 결과값(extraction)을 비교하였고, 오차 값(error)에 대한 계산 수식은 식 (12)와 식 (13)을 사용하였다. 여기서 CE는 중심점추출 오차, LE는 길이 추출에 대한 오차를 나타낸다. 표 1에서 보느바 와 같이 타원의 정보에 대한 추출 오차는 타원의 위치이동이나 크기의 변화에 영향을 받지 않고 단지 타원의 회전에 영향을 받음을 알 수 있다. 하지만 앞에서도 언급했듯이 타원의 축 길이에 대한 오차는 입력영상을 획득하는 과정에서 발생하였다고 볼 수 있으며 이 경우에도 최대오차 발생시 약 94%의 정확도로 타원의 정보를 추출하였다.

표 1. 시물레이션 결과
Table 1. Simulation results.

Input information		Center		Axis length		
Angle (θ_0)	Information	x_0	y_0	Short	Long	
90°	Reference image	Original	-1	7	6	12
		Extraction	-1	7	6	12
		Error (%)	0	0	0	0
	Shifted-scaled image	Original	4	7	8	16
		Extraction	4	7	8	16
		Error (%)	0	0	0	0
45°	Reference image	Original	6	8	6	12
		Extraction	6	8	6.33	12.30
		Error (%)	0	0	5.6	2.5
	Shifted-scaled image	Original	9	3	8	16
		Extraction	9	3	8.45	16.40
		Error (%)	0	0	5.6	2.5

$$CE(\%) = \frac{|\text{Original} - \text{Extraction}|}{32 \times 100}, \quad (12)$$

$$LE(\%) = \frac{|\text{Original} - \text{Extraction}|}{\text{Original} \times 100} \quad (13)$$

V. 광학적HT 필터

광학적인 HT실험을 위하여 본 논문에서는 행렬형태의 배열을 가지는 CGH 필터를 제작하였다. 대부분의 적용에서 행렬형태의 홀로그램 배열의 개수는 입력영상의 해상도와 동일하며 각각의 홀로그램의 크기는 출력 변수영역에서 정해지는 해상도에 의해서 결정되어진다.

본 논문에서는 32×32 개 CGH의 배열구조를 가지는 행렬형태의 필터를 구현하였고, 이것은 출력영역에서 33×33 개의 변수공간을 만들어낸다. 특히 본 실험

에서는 홀로그램의 제작을 간단히 하면서 광 효율을 극대화시키기 위해서 2-위상(dual-phase) 위상전용 홀로그램(phase only hologram)^[12, 13]을 사용하였고, 출력면에서 해상도를 증가시키기 위해서 CGH의 입력영상에 영첨가(zero padding) 방법을 사용하였다. 이렇게 해서 완성된 32×32 개의 CGH 행렬배열을 구성하는 하나의 격자는 하나의 홀로그램을 구성한다. 하나의 홀로그램을 다시 32×32 개의 화소(pixel)로 구성하였고, 최종적으로 CGH 하나의 화소를 2×2 개의 부 화소로 나누었다. 이와 같은 방법으로 제작된 HT CGH필터의 전체 해상도는 $32 \times 32 \times 32 \times 32 \times 2 \times 2$ 개의 화소값을 가진다. 32×32 개의 CGH 배열구조를 가지는 하나의 CGH를 만들기 위해서는 다음과 같은 몇 단계를 거쳐야 하는데, 첫째 식 (2)에 의해 각각의 입력화소 (x_i, y_i) 에 대한 점확산함수를 구한다. 여기서 i 는 1~32 사이의 값을 가진다. 둘째로 얻어진 점확산함수에 대한 푸리에변환(Fourier Transform)을 실시해서 크기값과 위상값을 얻는다.

마지막으로 푸리에변환 결과 얻어진 값을 CGH로 기록(encoding) 시킨다. 이렇게 해서 기록된 행렬배열의 홀로그램을 해상도 600dpi를 가지는 레이저 프린터를 이용해 출력하였고, 이를 광 실험을 위해 최종적으로 마이크로필름상에 광학적 축소를 하여 CGH필터를 제작하였다. 실제로 필터를 제작하기 위한 이러한 일련의 과정은 광학적인 실험결과에 중대한 영향을 미칠 수 있는 중요한 작업이다. 그림 5(a)는 32×32 개의 CGH배열을 가지는 행렬형태의 홀로그램 필터를 나타낸 것이며 그림 5(b)는 행렬형태의 홀로그램 필터를 구성하는 하나의 CGH를 나타낸 것이다.

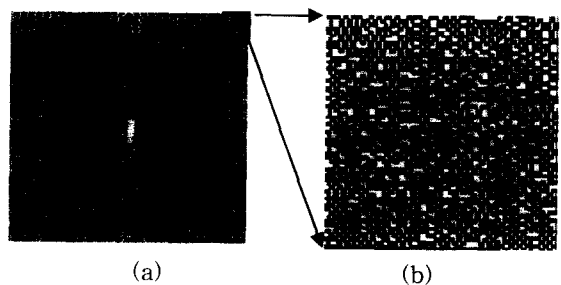


그림 5. HT을 위한 CGH 필터: (a) 3232개 CGH의 행렬배열; (b) 행렬배열을 구성하는 하나의 CGH

Fig. 5. Hough transform CGH filter:(a) matrix of the 3232 CGH; (b) one CGH of (a).

VI. 광학적 HT 실험

실제로 입력영상에 대한 광학적인 HT의 결과로부터 타원의 정보를 추출해보기 위해서 그림 6과 같은 광학적 실험장치를 구성하였다.

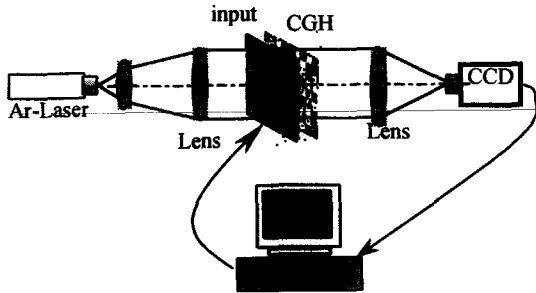


그림 6. 광학적 HT 실험 구성도
Fig. 6. Experimental setup for the optical HT.

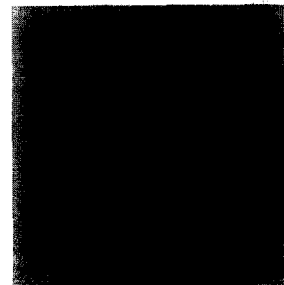
광원으로는 3-Watt의 출력을 가지는 아르곤(Ar) 레이저를 사용하였고, 입력영역에 입력영상과 HT CGH필터를 나란히 위치시켰다. HT된 결과를 관찰하기 위해서 출력면에 CCD 카메라를 설치하였고, 프레임 그래버(frame grabber)가 설치된 컴퓨터를 통하여 광학적 HT된 영상을 획득하였다. 입력영역과 출력영역 사이에는 초점거리 400mm인 FT렌즈를 위치시켰다. 따라서 입력영상의 HT는 각각의 입력 화소에 대응하는 CGH로 부터 재구성된 점확산함수의 전체 합으로 얻어진다. HT한 결과는 출력 변수영역에서 ρ 와 θ 의 직교 좌표계로 표현된다. 이때 θ 는 $[0, \pi]$ 까지 그리고 ρ 는 $[-\sqrt{2D}, \sqrt{2D}]$ 범위의 값을 가진다. 여기서 D 는 입력영상 크기의 1/2이다. 32×32 개의 화소로 구성된 입력에 대해서 출력은 33×33 개의 격자배열을 가진다.

본 실험에서 사용된 CCD 카메라의 해상도는 640×480 이고, 출력영상을 획득하기 위한 프레임 그래버 및 영상 분석용 소프트웨어는 NI(National Instrument)사의 IMAQ PCI-1424와 IMAQ Vision builder 5.0을 각각 사용하였다. 출력영상의 분석을 위하여 문턱치를 달리하면서 영상에 대해서 후처리를 실시한 후 최종적으로 얻어진 영상에 대해서 픽셀카운터 기능을 사용하여 원하는 지점의 좌표값을 추출하여 비교해 보았다.

본 논문에서는 실험으로 얻어진 출력영상에 대해서 후처리를 거치지 않은 원래의 영상을 시뮬레이션에서 사용된 좌표계로 이동시켜서 시뮬레이션 결과와 비교

하였다. 본 실험에 사용된 입력영상은 잡음 제거된 32×32 의 크기를 갖는 영상으로서 시뮬레이션에 사용된 영상과 동일한 영상이 적용되었다. 따라서 자연에 존재하는 잡음이 포함된 영상일지라도 전처리 과정을 거쳐 잡음을 제거시킬 필요가 있으며 본 논문에서는 잡음이 제거된 이진 영상에서부터 출발하였다.

그림 7(a)와 그림 8(a)는 입력영상으로서 각각 θ_0 가 90° , 45° 이고 중심점 (x_0, y_0) 가 $(-1, 7)$, $(6, 8)$ 인 타원이며, 크기(단축길이, 장축길이)는 $(6, 12)$ 로 동일하다. 그리고 그림 7(b)와 그림 8(b)는 입력영상에 대한 광학적 HT의 결과를 1차 회절영역에서 얻은 것이며, 그림 7(c)와 그림 8(c)는 HT된 결과 영상을 시뮬레이션에 사용된 좌표계로 이동시킨 결과이다. 실험에서 중심광의 영향을 줄이기 위해 출력면에서 이를 차단시켰으나 이것의 영향이 완전히 배제되지 않아서 그림에서 보는 것처럼 HT된 결과 영상은 광 축에 가까울수록 광의 세기가 강하고 멀어질수록 약해짐을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 제안된 방법은 광학적 HT의



(a)



(b)

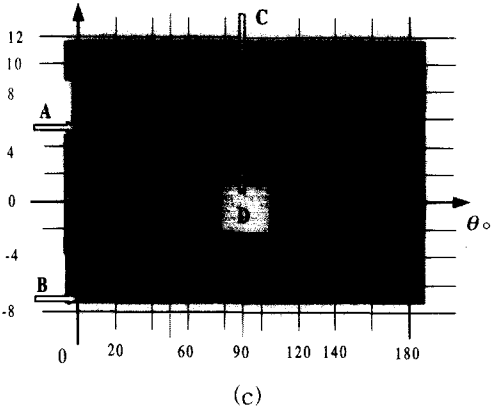


그림 7. 회전되지 않은 타원에 대한 광 실험 결과: (a) 입력영상; (b) HT결과; (c) 직각 좌표계에서의 HT결과
 Fig. 7. Experimental results of the not rotated ellipse: (a) input image; (b) HT result; (c) HT result on the Cartesian coordinate.

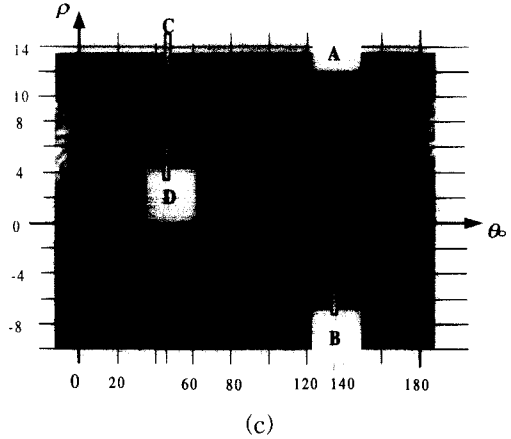
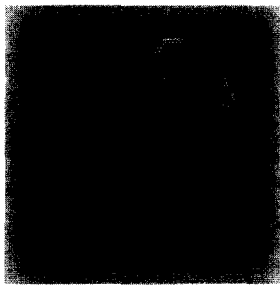
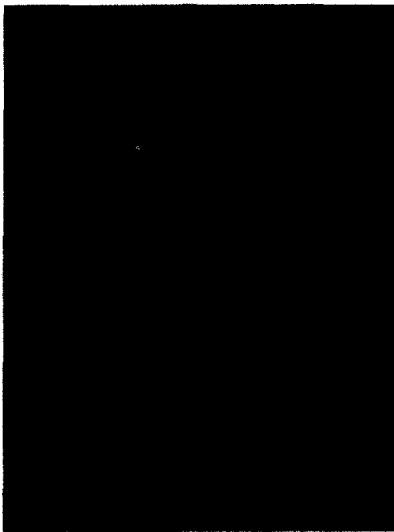


그림 8. 회전된 타원에 대한 광 실험 결과: (a) 입력영상; (b) HT결과; (c) 직각 좌표계에서의 HT결과
 Fig. 8. Experimental results of the rotated ellipse: (a) input image; (b) HT result; (c) HT result on the Cartesian coordinate.



(a)



(b)

결과에서 포락선의 최대, 최소 폭 지점으로부터 장축의 각도 θ_L 와 단축의 각도 $\theta_0(=\theta_S)$ 를 쉽게 얻을 수 있었다. 그리고 이들 지점에서 각각 포락선의 최대, 최소 점 A,B,C,D의 좌표 값을 곧바로 얻을 수 있었고, 이로부터 타원의 다섯 개의 변수를 추출할 수 있었다.

표 2에 광 실험 결과를 요약하였다. 시뮬레이션 결과와의 비교를 용이하게 하기 위하여 시뮬레이션과 동일한 표를 사용하였다. 실험과정을 통하여 포함된 여러 가지 오류로 인하여 시뮬레이션 결과에 비해 다소 오차가 증가하였지만 회전된 영상에 대해서도 약 91%의 정확도로 타원의 정보를 추출하였다.

표 2. 광 실험 결과

Table 2. Optical experimental results.

Input information		Center		Axis length		
Angle (θ_0)	Information	x_0	y_0	Short	Long	
90°	Reference (Fig.7)	Original	-1	7	6	12
		Extraction	-0.7	7.3	5.8	11.7
		Error (%)	0.9	0.9	3.3	2.5
45°	Reference (Fig.8)	Original	6	8	6	12
		Extraction	5.4	8.7	5.5	11.4
		Error (%)	1.9	2.1	8.3	5.0

VII. 결 론

본 논문에서는 광학적 HT의 결과로부터 입력영역에 존재하는 타원의 다섯 개의 변수를 찾는 방법에 대해서 제안하였고, 제안된 방법에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션과 광 실험을 통하여 결과를 비교하였다. 광 실험 과정에서 일부 오차가 포함되었지만 최악의 경우에도 약 91%의 정확도로 타원의 정보를 추출할 수 있었다. 실제로 본 논문에서의 기술은 이동 로봇의 운행 제어시스템 및 자동차 등의 자동항법 시스템에 적용이 가능하다. 본 논문에서 얻어진 광학적인 HT의 정확도라면 정상적인 운행조건에서 원하는 범위 내로 실시간 제어가 가능하리라 추측된다.

그러나 자연에 존재하는 실제의 영상은 본 논문에서 입력영상으로 사용한 것처럼 깨끗한 영상이 아니라 잡음이 첨가된 영상이다. 이 경우에는 입력영상으로부터 원하는 영상만을 얻기 위한 일련의 전처리 과정이 필요하며, 광학적인 전처리로 자주 이용되는 방법으로 광학적형태학(optical morphology)이 있다. 따라서 실제로 입력영상에 잡음이 존재하는 경우에는 이러한 광학적인 전처리 과정을 포함한 시스템적인 연구가 필요하며, 이에 관한 연구는 계속 진행 중이다. 또한 입력영상에 한 개 이상의 타원이 존재할 경우에는 변수영역에서도 한 개 이상의 정현곡선의 그룹들이 나타난다. 이 경우에도 광학적인 HT의 결과로부터 적절한 문턱화와 에지를 검출하기 위한 후처리 과정이 필요하다. 따라서 출력영상에 대해 적절한 후처리를 거치면 각각의 타원에 대한 포락선의 검출이 가능하고, 이로부터 각각의 타원에 대한 정보를 추출할 수 있으리라 생각한다. 그리고 입력영상에 존재하는 직선에 관한 정보도 본 논문에서 제안한 방법의 확대적용으로 추출이 가능하다. 이는 직선을 단축길이가 영(zero)인 타원의 한 종류로 취급함으로써 추출이 가능하며 현재 이에 대한 실험이 진행중이다.

참 고 문 헌

- [1] W. H. Steier and R. K. Shori, "Optical Hough transform", *Applied Optics*, vol.25, no. 16, pp. 2734-2738, 15 Aug. 1986.
- [2] 배창호, 박상국, 문규동, 김수중, "Optical Hough 변환을 이용한 손금인식", 제11회 신호처리합동 학술대회, 제11권 제1호, 875-878쪽, 서울대학교, 대한민국, 1998년10월
- [3] R. D. Duda and P. E. Hart, "Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures", *Commun. ACM*, vol.15, no. 1, pp. 11-15, 1972.
- [4] P. Hough, "Methods and means for recognizing complex patterns", *U.S. Patent* 3,069,654, Dec. 1962.
- [5] J. Richards and D. Casasent, "Extracting input line position from Hough transform data", *Applied Optics*, vol.30, no. 20, pp. 2899-2905, 10 July 1991.
- [6] 김기정, 박상국, 김종윤, 박세준, 배장근, 김수중, "Hough Transform정보로 부터 입력 직선의 위치와 실제 길이정보 추출", 대한전자공학회 하계종합 학술대회논문집, 제22권 제1호, 301-304 쪽, 목포대학교, 대한민국, 1999년 6월
- [7] S.G. Park, S.Y. Kim, S.J. Park, C.S. Kim and S.J. Kim, "Extracting the true length of the line from Hough transform data", *Proceedings of ITC-CSCC '99*, vol. II, pp.751- 754, Sado, Niigata, Japan, 13-15 July 1999.
- [8] P. Ambs, Y. Fainman, S.H. Lee and J. Gresser, "Computerized design and generation of space variant holographic filters", *Applied Optics*, vol. 27, pp. 4753-4760, 1988.
- [9] L. Feng and Y. Fainman, "Detection of a general ellipse by an optical Hough transform", *Applied Optics*, vol. 31, no. 17, pp. 3259-3262, 10 June 1992.
- [10] K. Mori and R. Ohba, "Optical Hough transform processor with a two dimensional array of computer generated holograms", *Applied Optics*, vol. 33, no. 14, pp.3111-3117, 10 May 1994.
- [11] S. Laut, F. Xu and Y. Fainman, "A matrix of 64×64 CGH for optical Hough transform processor", *SPIE*, vol. 3402, pp. 22-31, 1998.
- [12] C. Hsueh and A. Sawchuk, "Computer

generated double phase hologram", *Applied Optics*, vol. 17, no. 24, pp. 3874-3883, 1978.

[13] J. N. Mait and K. H. Brenner, "Dual phase hologram: improved design", *Applied Optics*, vol. 26, no. 22, pp. 4883-4892, Nov. 1987.

저 자 소 개

朴 祥 國(正會員)

1964년 7월 12일생. 1986년 2월 경북대학교 전자공학과 (학사). 1989년 2월 경북대학교 전자공학과 대학원(석사). 2000년 8월 경북대학교 전자공학과 대학원(박사). 1989년3월~1993년 12월 삼성전자 A/V연구소 영상연구실 연구원. 1994년 1월~현재 포항산업과학연구원 자동화연구센터 선임연구원. 1999년2월~현재 위덕대학교 겸임교수. 주관심 분야는 광 영상 복합 신호처리, 패턴인식, 컴퓨터 인터페이스

金 成 龍(正會員)

第37卷 SD編 第3號 參照

金 秀 重(正會員)

第36卷 D編 第9號 參照