'88 韓國自動制御學術會議論文集 1988. 10. 21~22

다면체 물체 인식을 위한 환상 레이저 빔 투사형 시각 정보 처리 시스템 개발

ㅇ김 종 형, 조 용 철, 조 형 석

한국 과학 기술원 생산 공학과

Development of a visual-data processing system for a polyhedral object recognition by the projection of laser ring beam

J. H. Kim , Y. C. CHO , H. S. CHO

Dept. of Production engineering, KAIST

Abstract

In this study, some issues on 3- dimentional object recognition and pose determination are discussed. The method employs a laser projector which projects a cyliderical light beam on the object plane where it produces a bright ring pattern. The picture is then taken by a T.V camera. The ring pattern is mathmetically the ellipse of which the geometrical parameters have the 3-dimentional feature of the object plane.

This paper gives the mathematical aspects of 3- dimentional recognition method and shows experimentally the variations of ellipse parameters as the spatial deviation of the plane object.

1. 서 론

최근 들어 산업용 로보트의 응용분야가 광범위해지고 다양화함에 따라 여러가지 작업 대상에 대해 로보트의 유연성(Flexibility) 및 적응성(adaptibility)를 높이기 위해서는 작업환경의 불확실성과 작업 공정의 진행과정을 감지, 인식 할 수 있는 적응 감지 시스템이 필요 하게 된다.

이러한 적응 감지를 위한 대표적인 센서로 시각 센서는 작업 대상물로 부터 떨어져서 가시 영역내에있는 물체의 형상인식 및 자세 정보, 작업 상황등을 감지및 인식 할 수 있으므로, 종전에는 단지 교시된 프로그램에 의존하던 로보트가, 불규칙하게 놓여있는 물체의 인식및 3차원 물체의 취급(handling), 조립작업 , 용접의 Seam tracking, deburring, spray painting, 충돌회피(collision avoidance) 등에 적용되어 한층 더 작업의 유연성과 공정의 질을 높이게 되었다 [1,2].

로보트에 의한 작업의 대부분이 3차원 공간에서 이루어지고 있기 때문에 일반적으로 작업 물체에 대한 3차원 정보를 필요로 하며 공정 작업의 경우 로보트 end-effector가 작업 대상물에 대해 정밀한 위치 및 방향 교정이 요구되고 있기 때문에 시각센서는 이에 대한 3차원 정보를 제공 할 수 있어야 한다.

시각센서인 카메라는 일반적으로 3차원 정보가 2차원상에 투영되므로 거리정보(Range information)의 상실을 가져오게 된다. 그러므로 2차원 영상 정보로 부터 물체에 대한 3차원 정보를 얻기 위해서는 추가의 정보가 요구되는 바, 본 논문에서는 Laser beam과 카메라와의 조합 시스템에 의해 효율적인 3차원 정보 추출 방법을 모색하는데 그 연구 동기가 있다.

3차원 작업 물체의 인식은 두대의 카메라로서 Stereo Vision System을 이용하여, 두개의 2차원 영상에 대한 trianguration으로서 3-D 정보를 얻어 낼 수 있다[4].

또한 카메라 한 대에 추가의 제약조건을 둠으로써 주어진 작업에 대한 3차원 정보를 얻는 방법이 있으나, 작업 물체에 대한 정확한 사전 정보가 요구되기 때문에 유연성 및 일반성이 결 여되어 있다[5,6].

이외에도 카메라 한 대를 end-effector 에 장착하여 로보트의 동적 정보를 이용하여 여러 image sequence 로 부터 여러 각도에 대한 물체의 3차원 정보를 추출할 수 있다[7].

Structure light와 카메라 시스템과의 조합에 의한 3차원 정보의 추출은 쉽고, 시스템 구성을 값싸게 할 수 있다. 또한 측정 대상물의 형상 정보 이외에 거리 정보를 구할 수 있으므로 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

레이저에 의한 강한 structure light를 카메라 영역 내에 투사 함으로써, 여러 작업 환경에 대한 광 외란 요인을 극복하고 작업 물체에 맺히는 광(light) 실루엣(silhouette)을 인식하고 laser trangluration method [1]에 의해 3차원 정보를 얻는 연구가 있었다. 여기서 laser beam은 point, line, cross, ring 또는 그 이외의 형상들을 투사하였다.

이중에서 line strip projection방법은 현재 가장 널리 쓰이고 있는 방법의 하나로, scanning장치와 더불어 투사한 각 strip의 실루엣을 조합하여 전체 물체에 대한 3-D map을 구하는 것이다[8,9].

이 방법은 전체 물체에 대한 정보를 얻는데 일반적 이기는 하나 scanning이 완료된 상태에서만이 가능하다. 또한 일정하게 주어지는 scanning분해능에 대해 range data의 scale간격이 달라지게 되므로 민감도가 문제시 되며, 형상및 3차원 인식은 strip의 실루엣들의 형상에서 불연속점들의 특징으로부터 면의 정보를 얻으므로, 처리시간이 길어 질 뿐 아니라 특징이 없는 평면작업 대상물에 대해서는 면에대한 인식이 불가능하다.

한편, 환상형(ring pattern)의 실루엣은 폐쇄형(closed shape)이므로 작업 대상물에 주사하였을 때 원래 형상의 변형된 정보로부터 측정면의 위치 및 방향(orientation)정보를 단 한번에 추출할수있는 장점이 있다. 또한 image상에서 특징이 없는 평면작업 대상물에 대해서도 3차원 인식이 가능하고, ring pattern실루엣의 불연속점을 인식함 으로써 strip-projection방식에의한 경우와 같은 효과를 얻을수 있다[10,11].

D.Wei[12]는 원추형(cone beam)을 작업 대상물에 주사하고 그 실루엣을 주사 방향과 coaxial방향에서 카메라로 인식하여 타원의 영상을얻고 이로부터 거리및 면의 normal vector를 인식하는 기하학적 방법을 연구하였다. 그러나, 타원의 장축에 대한 정보로 부터 면에 대한 정보를 구하기 때문에 완전한 타원의 형상이 주어졌을 경우에만 형상 인식이 가능하므로 두개 이상의 면에 대해서는 각각의 정보를 동시에 구할 수 없다.

본 연구에서는 레이저광 원형 빔(cylinder beam)으로 부터 환상형 (ring pattern)의 실루엣을 얻고 카메라 시스템과 조합하여 laser trianguration 방법에 의해 거리(range)정보를 추출하며, 일반적인 평면 물체에 대해서 원래 타원 형상의 변형된 정보로 부터 여러면을 동시에 인식 할 수 있는 영상 처리 기법과, 카메라에 의한 영상 정보로 부터 일반적인 3차원 다면체 물체에 대한 인식 및 자세 결정에 대한 연구를 수행하고저 한다.

로보트를 이용한 여러 작업에서 작업 대상물의 위치및 방향 설정이 중요합 을 보았다. 본 논문에서는 3차원 물체의 인식을 위하여 laser로 cylinder structure light beam을 만들어 측정 대상물에 투사시켜 ring pattern의 실루엣을 만들고 한 대의 카메라로 그영상을 받아 물체의 3차원 정보 즉,위치및 방향을 인식 하는 영상처리 vision system의 개발에 그 목적을 둔다.

일반적으로 cylinder beam이 평면에 투사되어 생기는 ring pattern의 실루엣은 카메라에서 타원의 영상이 생기며, 평면의 3차원적 특징인 위치 및 방향에 따라 타원의 기하학적 파라미터 (parameter)가 변하기 때문에 이로 부터 측정 대상물의 형상및 3차원 정보를, 미리 주어진 카메라와 레이저 calibration을 통하여 얻을 수 있다.

실험은 평면인 경우에대해 투사된 레이저 빔의 실루엣을 카메라로 받아 그 영상을 binary image로 처리하여 영상상의 타원을 인식한다. 타원의 파라미터를 찾는데는 recursive least square method[13]를사용 하였다. 평면을 위치 변화, 방향 변화 시키고 각 변화에 따른 영상상의 타원의 변화를 관찰하였다.

본 논문의 환상형(ring pattern)의 structure light는 투사되는 평면의 방향에따라 영상상의 타원이 기하학적 특징을 가지고 영상 정보를 binary code로 처리할수 있으므로 평면의 3차원 정보를 빠르고 쉽게 구해낼수있어 여러 분야에 응용 가능하다. 특히 작업면과 로보트 end effector에 부착된 tool과의 특정한 각도및 거리를 유지하면서 진행되는 작업들에 응용되어질수 있다.

2. 시각 정보처리 시스템

전체 실험 system은 Structure light를 만드는 projector system과 영상 정보를 받아 처리하는 카메라와 영상처리 system과 카메라 calibration및 시편 취급을 위한 로보트 system 으로 전체 실험 system이 구성되어 있다.

2.1 Projector system

He-Ne laser ----7mW Melles Griot Co.
structure light 구성을 위한 광원 공급용이다.

Beam Expander ----20:1로 Beam을 확대시켜준다.
Laser에서 나오는 빛의 직경이 1mm 이므로Beam expander에서는 직경20mm의 beam을 얻는다.

2.2 카메라와 영상처리 system

카메라----Sony CO.의 XC-77 CCD 카메라 768(H) x 493(V) Pixel 측정 대상물체및 물체에 형성된 ring pattern 을 감지한다.

Digitizer----274D-Colorado video frame (512x512, 256 gray level) 영상입력을 1/30초마다 디지탈화 하여 기억하고, 실시간 영상 digitizer로 내장된 723 DMA I/O Card를 통해 computer에 의해 hand- shake 방식으로 주어진 조건에따라 Read/Write 할수있다. 이러한 영상 정보를 컴퓨터에 줌으로써 측정 대상물의 형상 및 자세 정보를 얻는다.

Computer----IBM-AT

Digitizer로 부터의 영상정보를 처리 물체의 형상을 인식하고 ring pattern으로 부터 3차원 정보를 얻는 알고리즘 처리용 으로 사용 하였다.

2.3 X-Y- Table

X-Y- 의 3축 table로 카메라 calibration및 시편 취급에 사용된다.

3. Ring Pattern의 특성

3.1 Cylinder section representation [13,14]

본 연구에서 제안한 structured light는 원형 실린더 형태이며 이런 형태의 빛(light)이 측정 단면에 투사되면 환상형(ring pattern)의 밝은 단면을 얻을 수 있다. 일반적으로 실린더를 평면으로 짜른 단면은 타원의 식으로 표현될 수 있다.

원형 실린더 빔(beam)의 좌표를 그림 4 에서 처럼 {A} 좌표로 정의하고, ^{A}X와 ^{B}X가 ^{A}Z축을 중심으로 각도를 β 만큼 회전 시키고 다시 ^{B}Y 를 중심으로 각도 α 만큼 돌리면, 원형 실린더 빔과 같이되는 평면 좌표 {B}가 된다. 이때 {B}좌표의 ^{B}X-^{B}Y평면에서의 nomal vector는

$$\hat{n} = (\sin\alpha\cdot\cos\beta)\hat{i} + (\sin\alpha\cdot\sin\beta)\hat{j} + \cos\alpha\hat{k} \qquad \text{----- (3.1)}$$

로 나타내어 진다.

또한. {B}좌표의 ^{B}X- ^{B}Y면에 나타난 타원의 식은 다음과 같다.

$$\frac{{}^{B}X^{2}}{\left(\frac{r}{\cos\alpha}\right)^{2}} + \frac{{}^{B}Y^{2}}{r^{2}} = 1. \qquad \text{------(3.2)}$$

여기서 r은 실린더의 반경

(3.2)식에서 알 수 있듯이 타원의 장축및 그 방향을 알면 {B}좌표가 {A}좌표에 대한 rotation을 알 수 있다.

3.2 영상 면에서 본 실린더 광과 교차 평면과의 관계

실린더 광 (cylinder structured light)이 측정 대상물의 평면에 투사되어 생기는 환상형(ring pattern)이 영상면에서 어떤 형상으로 맺히는지 각 좌표간의 Trasformation 관계로 부터 구해보면 다음과 같다.

그림 2의 자세한 설명은 다음과 같다.

{A} ;실린더 광(cylinder structured light)의좌표계
{B} ; 측정 평면의 좌표

$$\{D\} = TRANS(^{A}Z, h_1) * ROT(^{A}Y, \phi)\{A\}$$

{C} ; 측정 평면의 좌표

$$\{C\} = TRANS(^{A}Z, h_2) * ROT(^{C}Y, \phi) * ROT(^{A}Z, \psi)\{A\}$$

{I} ; 영상 좌표 , ^{I}X- ^{I}Y면은 카메라의 영상면
1 ; {A} ^{A}Z=0 인 평면의 환상형 실루엣
1' ; 1 의 영상
2 ; {B} ^{B}Z=0 인 평면의 환상형 실루엣
2' ; 2 의 영상
3 ; {C} ^{C}Z=0 인 평면의 환상형 실루엣
3' ; 3 의 영상

빛 투사기(projector)와 카메라의 구성은 다음과 같다. 투사기에서의 실린더 빔 중심은 {A}의 ^{A}Z 축과 일치 한다. 카메라의 좌표 {I}는 {A}좌표에서 ^{A}Y축으로 45' 회전시켜 설치하였다. 따라서 {I}의 ^{I}Z- ^{I}X평면과 {A}의 ^{A}Z- ^{A}X평면은 같은 면이다.

{A}좌표의 ^{A}X- ^{A}Y평면에 환상형 실루엣 1 의 ^{I}X- ^{I}Y 영상면 에서의 영상 1'는 다음과 같이 구할 수 있다.

{I}좌표의 ^{I}X- ^{I}Y영상면에 대한 perspective transformation은 (3.2.1)과 같다.

$$^{P}_{I}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.2.1)$$

여기서 λ 는 촛점 거리

{I}좌표에서 {B}좌표로의 transformation은 ^{I}Y를 중심으로 각도 φ로 돌리고 Px, Pz만큼 translation시킨 결과이다.

$$^{I}_{B}T = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & Px \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.2.2)$$

따라서 {B}좌표의 점들을 {I}의 ^{I}X- ^{I}Y 영상면에 perspective transformation시키면 다음과 같다.

$$ {}^{I}P = {}^{P}_{I}T \cdot {}^{I}_{B}T \cdot {}^{B}P = \begin{bmatrix} x\cos\phi + z\sin\phi + P_x \\ y \\ -x\sin\phi + z\cos\phi + P_z \\ \frac{1}{\lambda}(x\sin\phi - z\cos\phi - P_z + \lambda) \end{bmatrix} \quad (3.2.3) $$

{B}좌표의 ${}^{B}X$- ${}^{B}Y$평면에 타원 실루엣의 {I}좌표의 영상면에서의 타원 형태는 다음과 같다.

$$ {}^{I}X = u = \frac{\lambda(x\cos\phi + z\sin\phi + P_x)}{x\sin\phi - z\cos\phi - P_z + \lambda} \quad (3.2.4) $$

$$ {}^{I}Y = v = \frac{\lambda y}{x\sin\phi - z\cos\phi - P_z + \lambda} \quad (3.2.5) $$

{B}좌표의 ${}^{B}X$- ${}^{B}Y$는 타원의 식을 가지므로

$$ Z=0 \ , \quad {}^{B}X^2 \cdot \cos^2\xi + {}^{B}Y^2 = r^2 \quad \xi = \phi - 45 \quad (3.2.6) $$

$$ {}^{B}X = \frac{(P_z - \lambda)u + + \lambda P_x}{\sin\phi u - \lambda\cos\phi} \quad (3.2.7) $$

$$ {}^{B}Y = \frac{(P_z - \lambda)\cos\phi v}{\sin\phi u - \lambda\cos\phi} \quad (3.2.8) $$

u,v의 관계로 표현하면,

$$ u^2 + \frac{2(P_z - \lambda)\lambda P_x\cos^2\xi + 2\cos\phi\sin\phi\lambda r^2}{\cos^2\xi(P_z - \lambda)^2 - r^2\sin^2\phi} u $$

$$ \frac{(z-\lambda)^2\cos^2\phi}{\cos^2\xi(P_z - \lambda)^2 - r^2\sin^2\phi} v^2 = \frac{r^2\lambda\cos^2\phi - \cos^2\xi\lambda^2 P_x{}^2}{\cos^2\xi(P_z - \lambda)^2 - r^2\sin^2\phi} \quad (3.2.9) $$

영상면에서의 u,v는 (3.2.9)식과 같이 타원의 식으로 나타난다. 따라서 영상면에서의 타원의 식을 구하여 (3.2.9)식의 계수를 알며는 Pz,Px, ϕ 를 구할 수 있다.

{C}좌표의 ${}^{C}X$-${}^{C}Y$ 평면에 생긴 타원의 실루엣 3의 ${}^{I}X$-${}^{I}Y$ 영상면에서의 타원 영상 3' 는 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 2의 정의에서 {C}좌표가 {A}좌표에 대해 ${}^{A}Z$축으로 각도 ψ 만큼 회전했다. 카메라의 ${}^{I}Z$-${}^{I}X$평면과 ${}^{A}Z$-${}^{A}X$ 평면이 동일 평면이므로 영상면에서의 타원도 $\psi' = \alpha \cdot \psi$ 만큼 ${}^{I}Z$ 대하여 기울어 진다. 카메라 calibration에서 α를 알 수 있다면 {C}좌표의 ${}^{C}X$-${}^{C}Y$ 평면의 환상형 실루엣 3의 영상면에서의 영상 3'를 구할 수 있다.

4.시각 정보 처리

레이져에서 형성된 실린더형 structured light가 물체의 면에 투사되어 생기는 환상형의 실루엣은 매우 높은 gray level값을 가지므로, threshold값을 적절히 주어 영상면에서 환상형 실루엣만 분리하여 binary code화 한다. 환상형의 실루엣이 포함된 binary 영상을 정련(refinding)을 위하여 shrinking and expanding 방법으로 noise를 제거한 후 외곽을 따라 영상면의 타원을 찾는다. 타원의 기하학적 parameters는 recursive least square방법으로 구한다.

일반적인 타원의 식은 다음과 같다[13].

$$ x^2 + \omega_1 y^2 + \omega_2 xy + \omega_3 x + \omega_4 y + \quad (4.1) $$

오차를 다음과 같이 정의 하면

$$ e_i = x_i^2 + \omega_1 y_i^2 + \omega_2 x_i y_i + \omega_3 x_i + \omega_4 y_i + \omega_5 \quad (4.2) $$

recursive least squre estimator를 이용하여 다음의 performance를 최소화 하는 parameters 를 결정 한다.

$$ \sum_{i=1}^{N} e_i^2 \quad (4.3) $$

parameter를 구하는 reculsive equation은

$$ \omega_i = \omega_{i-1} + \frac{K_{i-1}z(i)}{1 + z(i)^T K_{i-1} z(i)} \{x_1(i) - z(i)^T \omega_{i-1}\}, \quad (4.4) $$

$$ K_i = K_{i-1} - \frac{K_{i-1}z(i)z(i)^T K_{i-1}}{1 + z(i)^T K_{i-1} z(i)}, \quad (4.5) $$

여기서 $x_1(i) = x_i^2$,

$z(i)^T = [y_i^2, x_i y_i, x_i, y_i, 1]$,

$\omega(0) = 0$,

$K_0 = 10^5 I$ (I = unit matrix).

5. 실험 및 결과

실험 장치는 그림 1과 같이 되어 있으며, 카메라와 레이져는 45 기울어 배치했다. 평면의 위치 변화 및 방향 변화에 따른 영상면의 타원 의 변화를 보기 위하여 X-Y- θ Table에 평면을 놓고 그림2 의 방향으로 z=0mm, z=24mm, z=44mm 변화를 주었다.

평면의 방향 변화에 따른 영상면 타원의 변화를 보기위하여 평면을 그림2 의 AY 축을 중심으로 ϕ =0o ϕ = 5o , ϕ = ±10o 의 변화를 주었다. 또한, 그림 2의 AX 축을 중심으로 ψ =0o , ψ = ± 5o , ψ = ±10o 의 변화를 주었다.

각각의 영상면에서의 타원의 모양은 그림 5,6,7에 표시했다. 표시된 영상면은 160*160 pixel이다. gray level (255) 영상에서 threshold는 180을 주었다.

영상면의 타원은 reculsive least squre 방법으로 parameter를 구하였다. 파라미터는그림3에서 와같이 a,b는 타원의 장.단축이고 θ 는 타원의 기울어진 각도이고 Gx,Gy는 타원의 중심을 나타낸다. d는 중심간의 거리 차이이다. 각각의 결과는 표1,2,3 에 pixel 단위로 표시했다. 그리고 파라미터들의 수렵을 보기 위하여 그림8에 z=24mm, ϕ =0o 일때의 타원을 따라가는 iteration에 대해 w1 의 값 변화를 표시 했다.

6. 결 론

실린더 structure light를 평면에 투사하여 생기는 실루엣의 영상은 타원임을 보았다. 평면의 위치 변화에 따른 영상면의 pixel변화를 보면 영상면의 타원의 중심이 z=1mm 당 1.5 pixel정도 차이가 나고 장,단축은 카메라 가까이 올 수록 조금씩 커짐을 알 수 있다.

평면의 방향 변화에 따른 영상면의 pixel변화를 보면 우선 ϕ 변화에 따라 영상면의 타원의 단축이 ϕ =5o 에 따라 3 pixel 정도 차이가 남을 알 수 있다. 또한, ψ 변화에 따라서는 영상면의 타원의 회전이 생겨 ψ =5o 의 변화에 따라 θ = 2.7 의 틀어짐을 알 수 있다.

타원의 파라미터는 recursive least squre방법으로 타원을 1/3정도 돌면 수렵하는 파라미터의 값을 찾을 수 있었다. 따라서 영상면의 타원이 1/2 정도만 있어도 측정면의 위치 및 방향을 구할 수 있다.

7. 참고 문헌

1. Chai P.Day,"Robot Accuracy Issues and Methods of Iprovement." Robotics Today, Voll 1988,spring
2. K. Furuta,"Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback:Laser Beam Tracking System" IEEE,Industrial Electronics,Vol.35,No.1,P31-39 Feb. 1988
3. M. Idesawa,G.Kinoshita,"New Type of Miniatured Optical Range-Sensing Methods RORS and RORST" Journal of Robotics System,3(2),P165-181,1986
4. 임경찬,"Dimentional measurement of 3-D objects throuth stereo-metric image processing",한국 과학 기술원 석사 논문,1985
5. 변증은,"로보트 시각 시스템을 이용한 사각단면 물체의 조립 작업에 관한 연구",한국 과학 기술원 석사 논문,1987
6. 최용원,"2 차원 물체상 공혈 위치 인식을 위한 영상처리 방법의 연구" 한국 과학 기술원 석사논문,1985

7. 조용철,"산업용 로보트의 영상 궤환 제어를 위한 시각 정보 처리 시스템의 개발",한국 과학 기술원 석사 논문,1986
8. S.Gordon,"Locating Polyhedral Features from Sprase Light Stripe Data." IEEE,P801-806,1987
9. F.Tomita and T.Kanade,"A 3D Vision System gener-ating and matching shape descriptions in image" 2nd Int. Sym. of Robotics research,1985
10. J.Komiyama,"Development of the Optical Proximi-ty Sensor by the Ring Beam Pattern Projection -Integration for the Funtions of the Range sens-ing and Feature Detection."SICE,P381-382,1988
11. J.Paul,"Active,Optical Range Image Sensors" Machine Vision and Applications Vol.11 P127-152,1988
12. D.Wei,"The use of Taper Light Beam for Object Recognition" Robot Vision,IFS Ltd. P143-153,1983
13. T.Nagata,"Detection of an Ellipse by Use of a Recursive Least Squres Estimator." Journal of Robotics Systems,2(2) P163-177,1985

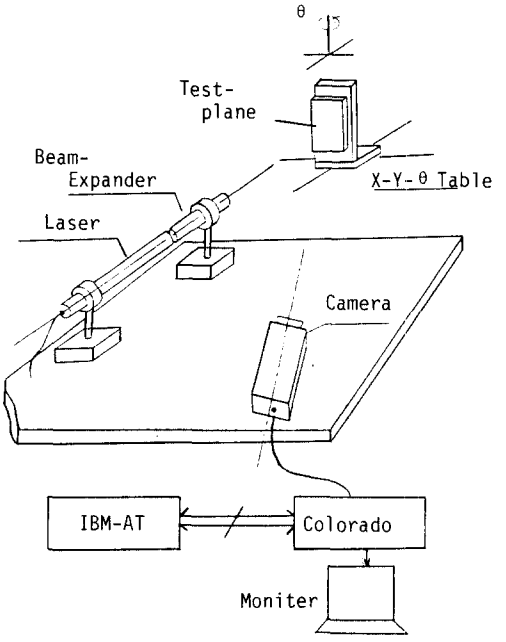


그림1. 전체 시스템 구성

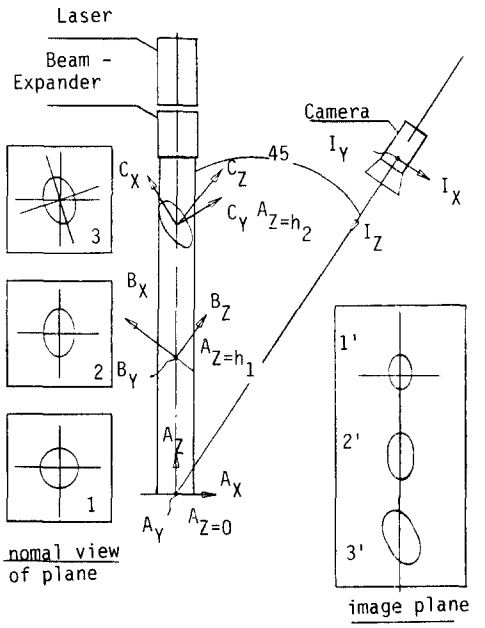


그림2. structured light와 영상면

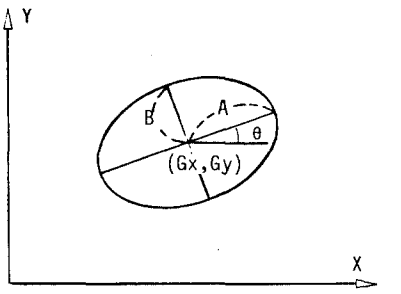


그림3. 타원

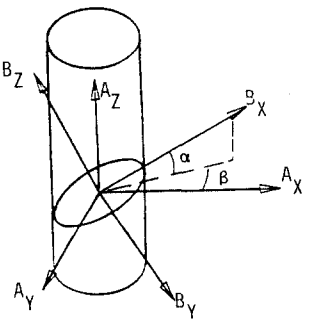


그림4. 실린더 빔의 좌표

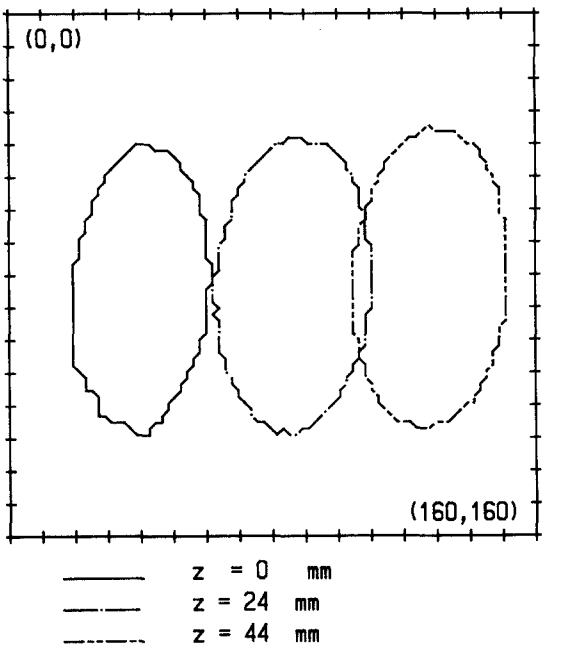
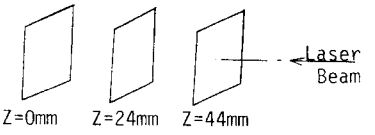


그림5. 평면의 위치 변화(Z)에 따른 타원의 변화



단위 : pixel

Zmm	a	b	θ	Gx	Gy	d
0	21	45	0	45	80	35
24	24	47	0	80	80	0
44	24	48	0	107	80	27

표1. 평면의 위치 변화에 따른 타원 파라미터의 변화

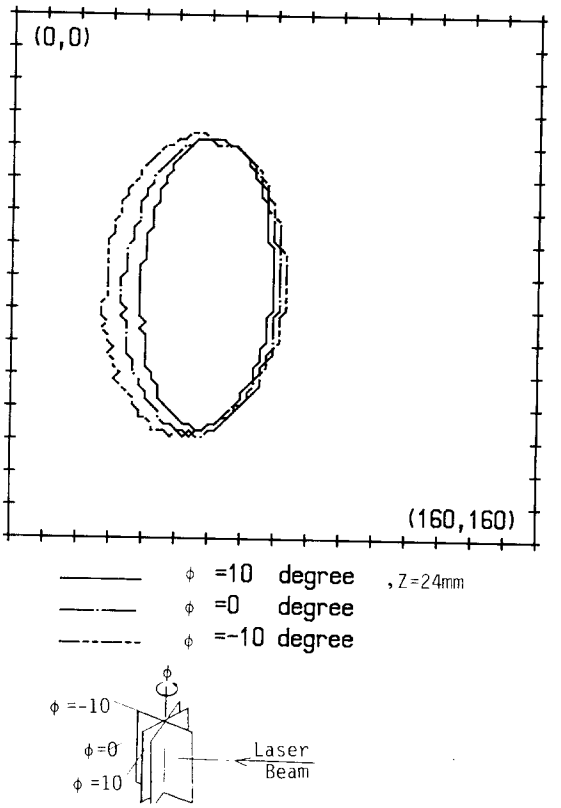


그림6. 평면의 방향(ϕ) 변화에 따른 타원의 변화

단위 : pixel

ϕ degree	a	b	θ	Gx	Gy	d
-10	26	45	0	58	80	2
-5	24	45	0	60	80	0
0	23	47	0	60	80	0
5	22	47	0	61	80	1
10	18	43	0	61	80	1

표2. 평면의 방향변화 (ϕ)에 따른 타원 파라미터의 변화

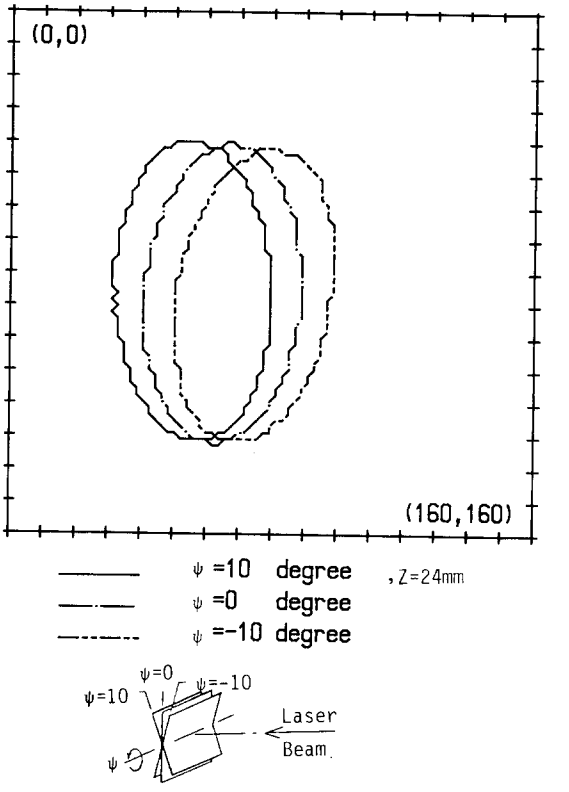


그림7. 평면의 방향(ψ) 변화에 따른 타원의 변화

단위 : pixel

ψ degree	a	b	θ	Gx	Gy	d
-10	24	46	5.12	72	81	7
-5	24	46	2.62	71	76	5
0	24	47	0.	67	76	0
5	24	47	-2.68	63	77	5
10	24	47	-6.18	60	80	8

표3. 평면의 방향변화 (ψ)에 따른 타원 파라미터의 변화

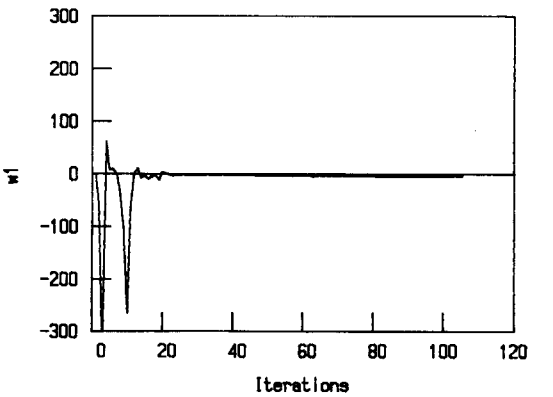


그림8. 타원 파라미터 wl
(z=24mm, ϕ=0 인 경우)