

◆특집◆ Machine Vision과 생산기술

Machine Vision을 이용한 형상 측정기술
(2차원 형상 측정을 중심으로)

박희재*, 황영민**

Dimensional Measurement Using the Machine Vision

Heui Jae Pahk*, Young Min Hwang**

Key Words : Measurement(측정), Vision(비전), Illumination(조명), Edge(경계), Focus(초점)

1. 서론

기술과 산업의 발달로 점점 그 생산물은 복잡하고 정교한 구성으로 진화되어 가고 있다. 이에 따라 이들을 측정하는 기술들 또한 진화되어 온 것이 사실이다. 반도체 웨이퍼 공정에 있어 수십 nm를 측정하고 있는 현실과 근세 시대에 실린더와 피스톤의 조립간격을 측정하기 위해 동전이 사용되었던 것을 비교해 보면 실로 측정기술의 놀라운 발전을 확인할 수 있다. 이렇게 발달한 측정 기술 중 한 분야가 vision을 이용한 측정이라 할 수 있다.

Vision이 산업 현장에 소개된 초기에는 vision을 이용한 측정을 생각할 때, 인간이 육안으로 할 수 있는 검사를 무엇이든 할 수 있을 것이라는 기대감이 있었던 것이 사실이었다. 하지만, vision을 이용한 측정에 있어 요구되는 복잡한 알고리즘을 위한 계산비용과, 이를 뒷받침할 만한 시스템의 부재와 일반인의 초기 기대와는 달리 인간과 같은 사고

를 지니지 못하는 vision 기술의 한계로 인해 초창기부터 널리 산업계에 적용되지는 못하였다.

하지만, 80년대 들어 컴퓨터, 카메라의 발전과 인공지능, 신경망, 통계학, 전산학 등 여러 학문의 발전과 더불어 vision 기술은 산업계에 많이 적용되기 시작하였다.

Vision 기술을 이용한 측정은 대량 제품 생산에 따른 자동화 기술의 발달과 더불어 널리 적용되었다. vision 기술은 대량 제품의 부품, 조립에 있어 인간의 노동력을 대신해서 적용되었으며, 반도체와 같은 인간 시력 밖의 미세 부품들의 등장으로 필수적으로 사용되어 오고 있다.

Vision을 이용한 측정에는 1차원(거리), 2차원(거리, 면적, 각도, 형상 인식), 3차원(2차원+높이, 방향...), 4차원(속도, 가속도, 모션 인식...) 측정 분야로 나누어 생각해 볼 수 있다. 그 중 2차원 측정 분야가 산업계에 가장 많이 적용된 분야라 할 수 있겠다. 2차원 측정은 영상으로부터 경계를 추출하여 경계 정보들을 가지고 거리, 면적, 각도 등을 측정하는 것인데, 이에 필요한 알고리즘 등은 vision 학문에 있어 초창기부터 많이 개발되어 왔으며, 일반적으로 산업계에서 널리 요구되는 것이 2차원 형상 측정이었기 때문이다.

이에 본고에서는 machine vision을 이용한 2차원 형상 측정을 위한 시스템 구상, 설계 및 알고리즘 적용 시 고려해야 할 사항, 형상 요소들의 측정 방

* 서울대학교 기계공학부 부교수

Tel. 02-880-7467, Fax. 02-875-8955

Email hjpahk@plaza.snu.ac.kr

측정 시스템 특히, 공작기계 오차 측정 및 보정, 광학을 이용한 2D, 3D 측정 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

**서울대학교 기계공학부

법 등에 대해서 개괄적으로 소개하여 vision 측정
에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 시스템 구성

2.1 시스템 정의

Vision을 이용한 형상 측정 시스템을 개발할 때
는 최적 영상을 얻기 위한 시스템 설계와 최적 알
고리즘을 개발, 적용하는 것이 중요하다.

따라서, 다음과 같은 질문을 통해 요구되는 시
스템을 명확히 하는 과정이 바람직하다.

1) 측정 대상의 유동성

: vision을 이용하여 측정하고자 하는 대상이 고
정되어 있을 경우, 전체 시스템은 측정하고자 하는
물리량을 가장 적합한 vision 알고리즘을 적용하기
에 유리한 영상을 얻도록 설계되어야 한다. 적용되
는 알고리즘도 그 고정된 특정 물리량을 위해서 개
발, 적용되기 때문에 효율적이다.

측정 물리량이 유동적일 경우, 즉 사용자 필요
에 따라 측정 대상이 바뀔 때는 적용되는 알고리즘
은 단순히 한 과정으로 고정될 수 없다. 이런 경우
유동적인 측정 대상물에 따라 필요로 하는 여러 알
고리즘들의 기능적 블록 구성을 통해 대응해 나갈
수 있다. 또한, 이런 경우는 특히 조명 시스템이 최
적 영상을 얻기 위해 다양하게 준비되어야 한다.

2) 시스템의 자동/수동 검사 여부

: 자동화 검사 장비인 경우는 전체 시스템의 안
정도가 무엇보다 중요하다. 따라서, vision 알고리즘
을 적용할 때 자동 검사시 발생할 수 있는 돌발적
영상들에 관한 세심한 고려가 중요하다.

3) 대상물의 측정 정도

: 측정하고자 하는 대상물의 측정 결과에 따른
시스템의 수행 여부에 따라 적합한 vision 알고리즘
을 적용하는 것이 중요하다. 예를 들어, 단순히 형
상의 존재 여부나, 이상 여부를 통한 양/불 판정을
위한 시스템인 경우 고정밀 측정을 위한 계산량이
많은 복잡한 vision 알고리즘이 적용될 필요는 없
다. 따라서, 측정 정도의 resolution에 따른 최적 시
스템과 최적 알고리즘을 적용하는 것이 중요하다.

4) 이상적 image의 modeling 및 구현

: 적용되는 vision 알고리즘의 복잡도는 처리하
고자 하는 영상의 복잡도에 비례한다. 따라서, 측정
하고자 하는 영상에 대한 model을 계획하고, 최대
한 이러한 영상을 구현하도록 하드웨어를 설계하는
것이 중요하다. 2차원 치수 측정에서 가장 유리한
영상 model은 측정 대상물을 제외한 나머지 noise
들은 최대한 줄이는 것이며, 명암 대비가 명확한
것이다.

따라서, 이러한 이상적 영상을 만들기 위해 최
적 광학계와 조명계를 설계하는 것이 중요하다. 이
는 나중에 적용되는 vision 알고리즘의 복잡도를 줄
이는 작업이다.

Vision 알고리즘이 복잡해질수록 영상처리에 대
한 안정도는 낮아질 수 밖에 없다. 따라서, 가능한
영상처리에 관해 제기되는 문제점에 대해서는 1차
적으로 하드웨어적으로 해결하는 것이 바람직하다.

5) 측정 시간에 따른 시스템 구성

: 측정량이 많을수록 측정 시간이 많이 소용되는
것은 당연한 일이다. 또한, 똑같은 시스템 구성에서
얻어진 영상에서 다른 측정량들을 동시에 측정하는
것은 vision 알고리즘의 복잡도를 증가시켜 영상처
리 속도를 증가시킬 수 있다.

이러한 경우는 측정 대상을 구분하여 다단 영상
처리 시스템으로 구성하는 편이 바람직하다. 예를
들면, 기어 치의 profile과 기어 표면에 있는 특정
형상을 측정하는 경우는 1단 시스템에서는 하부 조
명을 주어 기어 치 profile 검사를 수행하고, 2단 시
스템에서는 상부 조명을 주어 기어 표면의 특정 형
상을 측정하는 것이 바람직하다.

2.2 시스템 구성

개발하고자 하는 2차원 측정 시스템이 정의되
면 이에 필요한 최적 시스템을 설계하는 것이 중요
하다.

2.2.1 광학계

측정하고자 하는 대상물의 특성에 따라 이에 적
합한 배율과 카메라 구성이 필요하다. 측정 정도를
높이기 위해서는 측정대상물이 영상에 가득 차도록
배율을 높이는게 유리하나, 계산 시간이 늘 수도
있음을 고려해야 한다.

서로 다른 높이, 서로 다른 크기, 서로 다른 위
치에 있는 측정물의 특성에 따라 적합한 광학계를

구성해야 한다.

다음은 측정물의 특성에 따른 다양한 광학계 구성을 보여주고 있다.

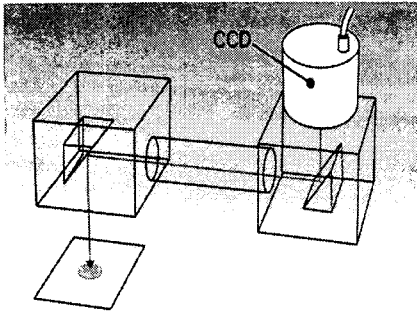


Fig. 1 L(Z) Type

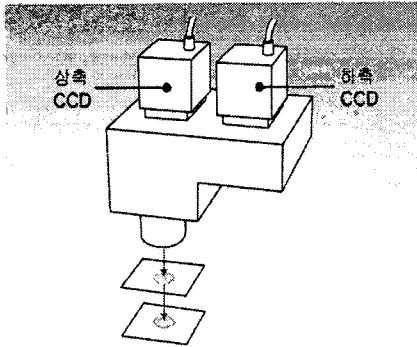


Fig. 2 Multi Focus Type

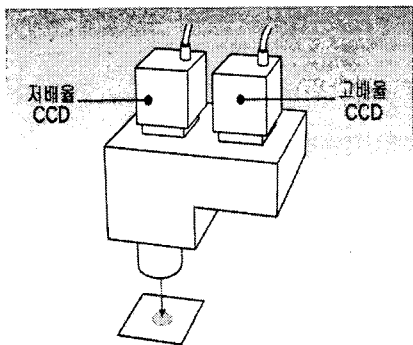


Fig. 3 Multi Zoom Type

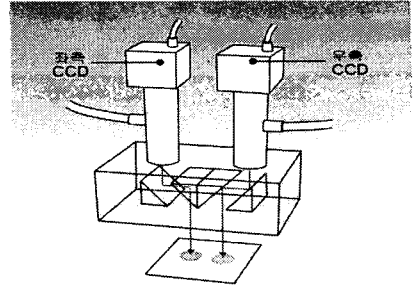


Fig. 4 Left-Right Image Type

2.2.2 조명계

영상처리에 있어 원하는 영상을 얻기 위해 가장 중요한 요소가 바로 조명이다. 조명 조건에 따라 영상이 변하며, 이에 따라 필요한 vision 알고리즘이 변하기 때문이다. 조명을 선택할 때는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

1) Camera Field of View(FOV)

:카메라의 FOV 크기는 영상처리가 수행되어야 할 대상물의 크기와 범위에 따라 결정되어지기 때문에, 최적 조명계는 카메라의 FOV에 따라 결정되어야 한다.

2) Distance between the Illumination System and Work Piece

:조명계와 측정물 간의 거리에 따라 영상의 질이 변하게 된다. 조명시스템과 측정 대상물에 따라 거리에 따른 조사빛의 균일도와 각이 변하기 때문이다.

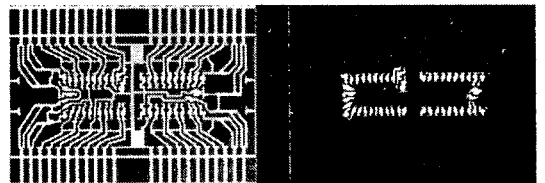


Fig. 5 Lead Frame Images vs. Distance between the Illumination System and Work Piece

Fig 5는 조명계와 측정 대상물의 거리에 따른 Lead Frame의 영상 차이를 나타낸다. 거리를 최적으로 맞추어 따라 silver plated section만이 더 명확

히 보이게 할 수 있음을 볼 수 있다.

3) Work Piece Shape, Condition and Color

:조명 시스템은 측정 대상물의 표면의 모양, 조건에 따라 변해야 한다. 또한, 조명의 색상은 측정 대상물의 색상에 따라 결정되어야 한다.

Fig. 6은 조명색상에 따른 영상의 차이를 보여 준다. 플라스틱 뚜껑에 묻은 기름이 백색광에서 더 잘 보이며, BGA 경우에 Blue 조명을 사용하면 BGA의 background 패턴이 없어지고, solder ball이 더 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

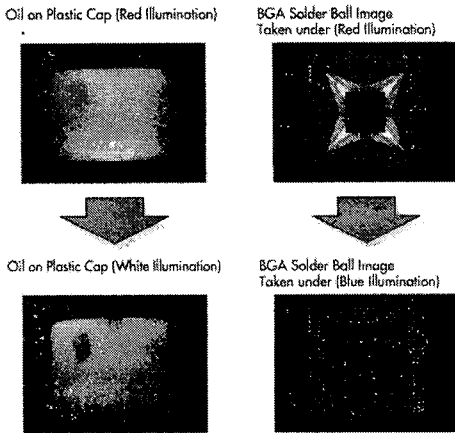


Fig. 6 Selectable Color for the Target Application

4) Imaging Objectives

:측정하고자 하는 대상이 무엇인지 명확해야 한다. 형상을 측정하고자 하는 것인지, 표면의 scratch, printing을 측정하는 것인지에 따라 조명 조건은 다양하게 변하기 때문이다.

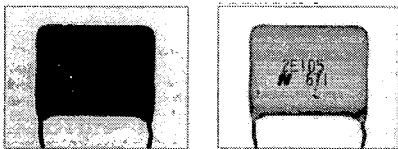


Fig. 7 Back Light vs. Top Light

Fig.7은 목적에 따른 상, 하 조명을 달린 한 것이며, 목적에 따라 평행광 조명이나, Sharp Cut Filter, Polarizing Filter 등을 사용하는 경우도 있다.

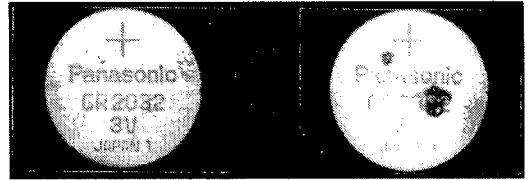


Fig. 8 Coaxial Light(Left) vs Parallel Light(Right)

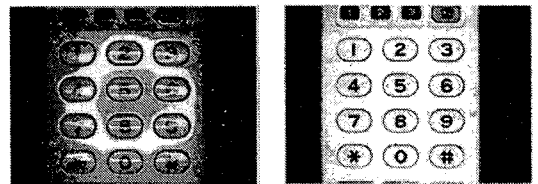


Fig. 9 Not using a polarizing plate(Left) vs Using a polarizing plate(Right)

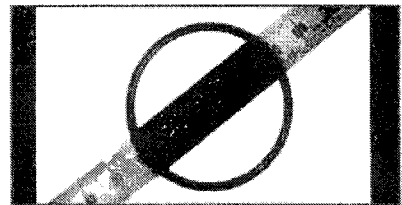


Fig. 10 Image Using Sharp Cut Filter

Fig. 8은 coaxial 조명보다 parallel 조명을 사용하였을 경우에만 보이는 수은 전지 표면의 낮게 패인 홈집 영상을 나타내고, Fig. 9는 polarizing filter를, Fig. 10은 sharp cut filter를 사용하였을 경우의 최적 영상들을 보여주고 있다.

다음은 다양한 조명 source들의 성능을 비교한 그림이다. 목적에 따라 적합한 조명 source를 선정하는 것 또한 중요하다.

최근에는 영상 조건에 맞는 조명 설계, 조명 세기 제어 등의 편의성으로 LED가 많이 사용되고 있다.

3. 2차원 치수 측정을 위한 Vision 알고리즘

3.1 Edge Extraction 알고리즘

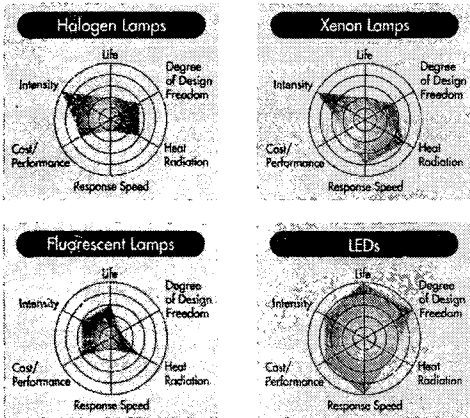


Fig. 11 Comparison of Illumination Sources

카메라를 통해 얻어진 영상에서 거리나, 면적, 각 등을 측정하기 위해 우선적으로 경계 edge를 정확히 추출해내는 것이 중요하다. 영상의 edge는 입력 영상에 대한 많은 정보들을 가지고 있다. edge는 물체가 어디에 있으며, 물체의 모양과 크기, 텍스처가 어떠한지를 말해준다. edge는 영상의 밝기가 낮은 값에서 높은 값으로 또는 높은 값에서 낮은 값으로 변하는 지점에 존재한다. 많은 edge 추출 알고리즘들이 개발되어 소개되어졌다. 유사 연산자 기법, 차 연산자 기법, 1차 미분법, 2차 미분법을 이용한 여러 가지 방법이 있다. 여기서는 몇몇 대표적인 edge 추출 알고리즘을 간단히 살펴 보고자 한다.

3.1.1 Sobel 알고리즘

Sobel 마스크를 이용한 edge 검출 방법은 2차 미분 연산자로 x축, y축으로 각각 한번씩 미분하게 되어 있다. 2차 미분 연산자에 해당하는 마스크의 행렬 형태는 다음과 같다.

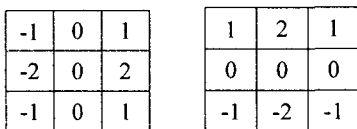


Fig. 12 Sobel Mask (Gx:Left, Gy:Right)

Sobel 마스크를 이용하여 검출된 edge의 기울기 크기는 다음과 같다.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

Sobel 방법은 잡음에 강한 특징이 있으나, edge를 두껍게 검출하는 단점이 있다.

3.1.2 Prewitt 알고리즘

Prewitt 마스크는 sobel과 비슷한 결과를 얻는데 비하여 응답시간이 약간 빠르나, 잡음에 약하며 수직 수평 edge를 강조하는 특징이 있다. prewitt 마스크는 다음과 같다.

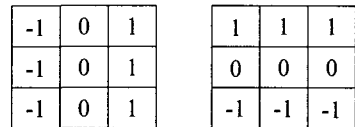


Fig. 13 Prewitt Mask (Gx:Left, Gy:Right)

3.1.3 Roberts 알고리즘

Roberts 마스크는 매우 빠른 계산 속도를 지니며, 작은 커널을 사용하기 때문에 잡음에 매우 민감하며, 매우 분명한 edge만을 검출해 낸다. 마스크 모양은 45도 기울기를 가지고 있다.

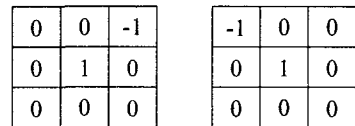


Fig. 14 Roberts Mask (Gx:Left, Gy:Right)

3.1.4 Laplacian 알고리즘

이상적인 윤곽선 검출은 윤곽선의 중심에 존재하는 윤곽선만을 표시해야 하는데 라플라시안 연산자는 이러한 윤곽선의 국한성을 잘 보여준다.

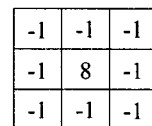


Fig. 15 Laplacian Mask

라플라시안 연산자의 특징은 연산속도가 빠르며, 2차 미분 연산자로서 모든 방향의 edge를 검출해 낸다. 또한, 다른 연산자와 비교하여 날카로운

edge를 검출한다.

3.1.5 Canny 알고리즘

Canny 마스크를 이용한 알고리즘은 먼저 가우시안 마스크를 이용하여 잡음을 제거한 후 sobel 마스크와 같은 edge 검출 마스크를 수행하는 것이다. 이러한 두 번의 과정 중 첫 번째 과정에서 잡음 제거 효과가 생기고 잡음이 제거된 영상에서 edge를 추출하는 것이다. 이때, edge를 추출하는 연산자로 라플라시안을 사용하는 것이 가우시안-라플라시안 (Laplacian of Gaussian) 연산자로써, 맥시칸 모자 필터라고도 한다.

$$LoG(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

3.1.6 Subpixel 알고리즘

Subpixel 알고리즘은 pixel 단위의 경계정보를 더 분할하여 보다 정확한 edge의 위치 및 방향 정보를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 계산에 소요되는 시간이 긴 단점이 있다. subpixel 알고리즘은 처음에 Laplacian-Gaussian 마스크로 convolution된 이미지에서 0점 교차점, 즉 1차 edge를 추출한 후, 1차 edge 점 영역을 다음과 같은 2변수 4차 면함수로 fitting한다.

$$f(x, y) = k_0 + k_1x + k_2y + k_3x^2 + k_4xy + k_5y^2 + k_6x^2y + k_7xy^2 + k_8x^2y^2 \quad (3)$$

Fitting된 함수에서 subpixel 단위로 더욱 정확한 0점 교차점을 찾아, 2차 sub-edge를 추출하는 것이다.

Subpixel 알고리즘은 정밀 측정 용도로 사용되고 있다.

3.2 Focus 알고리즘

카메라를 통해 명확한 영상을 얻기 위해서 focus를 측정하여 영상 시스템을 setting하는 것이 2차원 측정에서 있어 중요하다. 다음은 focus를 측정하는 대표적인 알고리즘을 소개해 본다.

3.2.1 Fourier Transform

Image의 fourier transform으로 직접 그 공간 주

파수 분포를 알 수 있다. Horn는 focus양을 측정하기 위해 FFT에 기반한 측정 기술을 제안했다. 이것은 날카로운 edge는 고주파수를 가지므로, 기준을 power spectrum에서 고주파수 에너지가 최대가 되도록 하는 것으로 원리적으로 좋은 아이디어나, 계산비용이 큰 단점이 있다.

3.2.2 Gradient Magnitude Maximization

Focus 양은 edge 특성에 영향을 주기 때문에, focus 양을 측정하기 위해 edge 검출기를 쓰는 것은 타당하다. Tenenbaum은 threshold gradient magnitude를 이용한 일명 tenengrad란 방법을 제시하였다. 이 방법은 각각의 image point(x,y)에 대한 gradient $\nabla I(x,y)$ 를 계산하여 threshold값보다 크면, 그 절대값을 합산하는 것이다.

3.2.3 Histogram Entropy

Blurred edge가 있는 영상에서 grey-level frequency-of-occurrence 히스토그램은 균일한 분포를 가지려 한다. 초점이 맞은 edge의 영상은 bimodal intensity 히스토그램을 가진다. 이에 population entropy E는 히스토그램의 균일성을 측정하는 것이다. P(I)를 grey-level I의 발생 주파수라고 하면, histogram entropy는 다음과 같이 정의된다.

$$E = - \sum P(I) \ln |P(I)| \quad (4)$$

모든 P(I)가 똑같은 때 E는 최대값을 가지며, I의 한값을 제외하고 P(I)가 모두 0이면 E는 최소값을 지닌다. 정의에 따라 blurred edge 영상은 날카로운 edge 영상보다 더 큰 엔트로피를 가지게 되므로, criterion은 E를 최소화하는 것이다.

3.2.4 Sum-Modulus-Difference

Sum-modulus-difference는 Javis에 의해 제안된 측정 방법이다. 이는 scan line을 따라 이웃하는 pixel들간의 intensity 차이를 합하는 것이다.

$$SMD_x = \sum_x \sum_y |I(x, y) - I(x, y-1)| \quad (5)$$

Criterion은 SMD를 최대화하는 것이다. 만약 grey-level variance가 scan line을 따라 발생하지 않으면 좋은 결과를 얻을 수 없다. 이런 문제는 다른

방향으로 구해 서로 합산하는 것이 좋다.

$$SMD_y = \sum_x \sum_y |I(x, y) - I(x+1, y)| \quad (6)$$

$$SMD = SMD_x + SMD_y \quad (7)$$

3.3 Calibration

화상으로부터 측정을 수행하여 실제 값을 얻기 위해서는, 화상 좌표를 실제 좌표로 바꾸어 주는 보정이 필요하다. 보정 알고리즘에서 고려한 왜곡들은 카메라 렌즈의 radial distortion, decentering distortion과 카메라 조립 및 렌즈 가공 중에 발생하는 thin prism distortion 등이다.

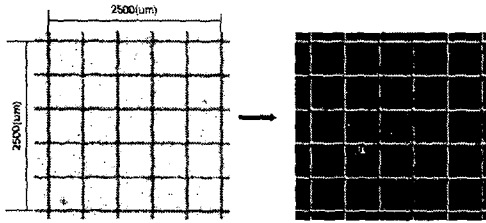


Fig. 16 Image of Standard Specimen for Calibration

보정을 위해서는 먼저 그림에서 보이는 것과 같이 시편을 이용하여 격자의 교차점들을 구한 후, 이 교차점들의 실제 좌표와 프레임 좌표들 사이의 매핑 식을 계산한다. 매핑 식 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} &= u' + (g_1 + g_3)u'^2 + g_4u'v' \\ &+ g_1v'^2 + k_1u'(u'^2 + v'^2) \quad (8) \\ \frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} &= v' + g_2u'^2 + g_3u'v' \\ &+ (g_2 + g_4)v'^2 + k_1v'(u'^2 + v'^2) \end{aligned}$$

where

$$u' = \frac{r - r_0}{f_u}, \quad v' = \frac{c - c_0}{f_v}$$

$r_{i,j}$: 3*3 rotation matrix defining the camera orientation

t_1, t_2, t_3 : translation vector defining the camera position

k_1, g_1, g_2, g_3, g_4 : distortion coefficients

x, y, z : the coordinations of any point in the world coordinate system

r, c : the position of the corresponding pixel in the digitized image

r_0, c_0 : the position of the pixel at which the optical axis intersect the plane

4. 2차원 치수 측정

4.1 점 추출

점 추출 방식에는 octagon edge detection, closest edge detection, first edge detection 등이 있다. 먼저 octagon edge detection 방식은 일정 범위 내에서 방향에 관계없이 경계를 추출하는 방식이며, 특정 threshold 이상의 경계 점 중 가장 두드러진 경계점을 추출하게 된다. closest edge detection 방식은 일정 범위 내에서 일정 방향으로 추적해가며 가장 가까운 경계점을 추출하게 된다. first edge detection은 일정 범위 내에서 일정 방향으로 특정 threshold 이상의 경계점 중 가장 두드러진 경계점을 추출하게 된다.

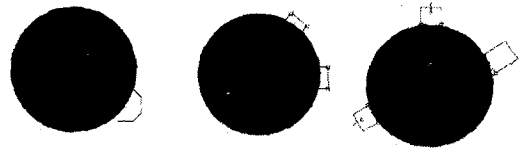


Fig. 17 Results of Point Edge Extraction

위의 그림은 각각의 경계추출 방식에 따라 경계점을 추출한 결과를 보여주고 있다. octagon edge detection은 가장 일반적인 경계점을 추출하고자 할 때 주로 사용되어지며 closest edge detection은 물체의 모서리를 측정하고자 할 때 또는, 기준면과의 가장 가까운 거리를 측정하고자 할 때 사용되어질 수 있다. first edge detection은 측정 방향에 따라 해석 결과가 달라지는 경우, 특히 thin line의 측정 시 방향성을 가지고 경계를 추출해야 할 경우 유용하다.

4.2 직선 해석

직선 해석은 수동 직선 해석 방법과 자동 직선 해석 방법, 두 종류로 볼 수 있다.

먼저 수동 직선 해석 방법은 경계 추출로 얻은 경계점 집합으로부터 직선 해석에 적용될 데이터를 선택하고 이를 직선 해석 모델 식에 적용하는 방법

이다.

자동 직선 해석 방법은 수동 방법과는 달리 화상에서 일정 범위를 지정해주면, 자동으로 지정된 범위로부터 직선의 경계점들을 찾아 직선 해석 모델 식으로부터 직선을 구한다. 구한 직선을 기준으로 다시 데이터를 분석하여 원하는 허용오차를 넘는 데이터는 직선 해석에서 제외가 되도록 하여 다시 직선 해석을 하는 경우도 있다.

직선의 모델 식은 다음과 같다.

$$aX + bY + 1 = 0 \quad (9)$$

$$E = \sum_{i=1}^n (aX_i + bY_i + 1)^2$$

여기서 직선 모델 식은 최소 오차 자승법을 사용하여 E를 a, b에 대해 편미분하여 그 값이 0이 되는 a, b를 구한다.

4.3 원 해석

원 해석은 직선과 마찬가지로 수동 원 해석 방법과 자동 원 해석 방법이 있을 수 있다.

원의 모델 식은 다음과 같다.

$$(X_i - X_o)^2 + (Y_i - Y_o)^2 = r^2$$

$$E = \sum_{i=1}^n (X_i^2 - 2X_iX_o + Y_i^2 - 2Y_iY_o + Z)^2$$

where $Z = X_o^2 + Y_o^2 - r^2$

(10)

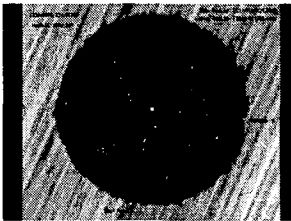


Fig. 18 Result of Circle Analysis

4.4 타원 해석

타원 해석은 직선, 원과 마찬가지로 수동 타원 해석 방법과 자동 타원 해석 방법이 있을 수 있다. 타원의 모델 식은 다음과 같다.

$$aX^2 + bY^2 + fXY + uX + vY - 1 = 0$$

$$E = \sum_{i=1}^n [(aX_i^2 + bY_i^2 + fX_iY_i + uX_i + vY_i) - 1]^2 \quad (11)$$

$$c_x = (uf - 2bu) / (4ab - f^2)$$

$$c_y = (vf - 2av) / (4ab - f^2)$$

$$-\tan \alpha = \frac{f}{(a - b)} \quad (12)$$

$$r_1^2, r_2^2 = \frac{-uf + (av^2 + bu^2) + 4(ab - f^2/4)}{2(ab - f^2/4)[a + b \pm \sqrt{(a - b)^2 + f^2}]}$$

c_x, c_y : 타원 중심의 x좌표, y좌표

r_1, r_2 : 장, 단축의 반경

α : r_1 의 각도 (장축을 기준)

5. 결론

Vision 기술을 이용한 형상 측정은 산업계에 널리 사용되어지고 있다.

Vision 측정 시스템을 개발하기 위해서는 측정하고자 하는 대상물에 대한 깊은 고찰을 통해 최적 vision 알고리즘을 적용하기 위한 최상의 영상을 얻도록 설계되어야 한다. 이러한 영상을 얻기 위해서는 광학, 조명, 알고리즘 간의 깊은 연계성에 대한 이해가 필요하다.

본 고에서는 이러한 시스템 개발에 대한 고찰과 vision 알고리즘에 대해 살펴보았다. 또한, 점, 직선, 원, 타원 측정 방법을 소개하여 vision을 이용한 형상 측정에 대한 이해와 도움을 주고자 하였다.

참고문헌

1. William K. Pratt, "Digital Image Processing," John Wiley & Sons, pp. 491-556, 1991.
2. Ramesh Jain, "Machine Vision," MIT Press and McGraw-Hill, pp. 140-186, 1995.
3. E. Krotkov, "Focusing," Int. J. of Comput. Vision, Vol. 1, pp. 223-237, 1987.
4. B. K .P. Horn, "Focusing," MIT Artificial Intell. Lab., Memo no. 160, May, 1968.
5. R. A. Javis, "Focus optimization criteria for computer image processing," Microscope, Vol. 24, No. 2, pp. 163-180, 1976.
6. J. M. Tenenbaum, "Accommodation in computer vision," PH.D. thesis, Stanford Univ., 1970.