

원형단면 부품조립에서의 비전 기반 부품형상 및 상대오차 측정

Vision-Based Part Shape and Misalignment Measurement in Cylindrical Peg-in-Hole Tasks

김진영*, 조형석
(Jin-Young Kim and Hyung-Suck Cho)

Abstract : For successful deformable part assembly, information about its deformation as well as possible misalignment between the hole and its respective mating part are essential. Such information can be mainly acquired from visual sensors. In this paper, part deformation and misalignment in deformable cylindrical peg-in-hole tasks are measured by using a visual sensing system. First, a series of experiments to measure the position of an arbitrary point are performed. Next, an algorithm to measure misalignment and part shape as part deformation are presented, and a series of experiments on them are performed. Experimental results show that the proposed algorithms and the system are effective in measuring part deformation and misalignment.

Keywords : visual sensing system, part deformation, misalignment, three-dimensional measurement, cylindrical peg-in-hole task

I. 서론

단단한 부품의 조립에 관한 많은 연구[1,2]에 비해, 유연부품조립에 관한 연구는 그리 많지 않다. 유연부품조립의 경우 부품변형이 발생하기 때문에, 성공적인 조립을 위해서는 부품변형과 상대오차를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 이는 시각센서에 의해 이루어질 수 있다.

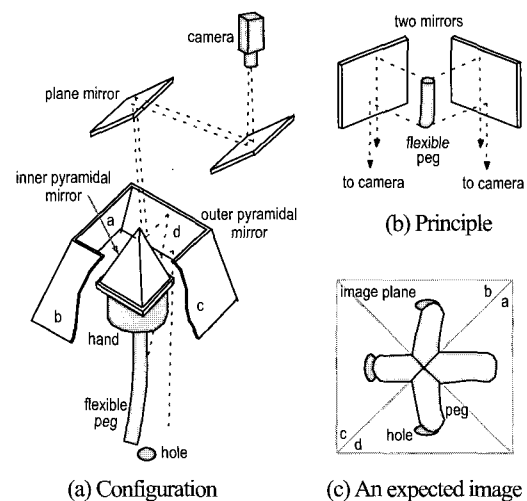
시각센서를 이용한 유연부품조립에 관한 연구로써 Inoue 등[3]은 로프를 링에 삽입하는 작업에서 로프 선단과 링의 중심을 측정하였는데, 로프에 비해 링의 직경이 훨씬 커서 로프에 의한 링의 폐색(occlusion)이 무시되었다. Nakagaki 등[4]은 전선삽입 작업에서 전선의 변형형상을 측정했는데, 구멍 위치를 미리 아는 것으로 가정하였다. 이를 비롯한 지금까지의 연구에서 3차원 부품변형 및 상대오차를 모두 측정하는 연구는 없었으나, Kim 등[5]은 한 장의 영상으로 3차원 측정이 가능할 뿐 아니라 폐색도 극복할 수 있는 시각측정시스템을 제안하였다.

본 논문에서는 앞에서 제안된 측정시스템[5]을 이용하여 원형단면을 갖는 부품(이하 원형부품이라 부른다)의 조립작업에 있어서 부품변형 및 상대오차를 측정하는 알고리즘을 제안하고, 측정실험을 수행한다. 우선 3차원 공간상의 임의점의 위치 측정실험을 통해 시스템의 이론적 측정성능과 실제 성능을 비교한다. 다음 부품변형으로서의 부품형상을 측정하는 알고리즘, 부품과 구멍의 영상에서 부품과 구멍을 서로 구분 인식하는 알고리즘, 원형부품의 투영영상에서의 중심선 추정 알고리즘 등을 제안하고, 부품형상 측정실험을 수행한다. 또한 상대오차 측정을 위해 한 장의 영상에 포함된 네 구역 중 두 구역을 선택하는 알고리즘, 폐색된 구멍의 중심선 추정 알고리즘 등을 제안하고, 이를 토대로 상대오차 측

정실험을 수행한다. 실험결과인 측정오차 검토를 통해 제안된 알고리즘과 측정시스템의 유효성을 검증한다.

II. 시각측정시스템

그림 1은 카메라 한대와 사각뿔거울(pyramidal mirror) 등으로 이루어진 유연부품조립용 시각측정시스템을 보여주는데, 그림 1(b)의 스테레오 원리에 의해 3차원 정보를 얻는다. 측정 대상물의 임의의 한 점에서 출발한 빛은 먼저 외측 사각뿔거울의 네 면에 투영되고 이로부터 내측 사각뿔거울의 대응하는 네 면을 거쳐 위로 향하게 된다. 그림 1(c)는 카메라에 투영된 영상의 예로써 사각뿔거울의 네 면에 대응하여 영상면이 4분할 되어 있다. 이 시스템은 사각뿔의 두 면 만에 의해서는 보이지 않는 반대편의 정보까지 이용함으로써 조립 시 폐색에 의한 정보누락을 극복하는 다방향(multi-directional) 측정성을 갖고 있다.



* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 10. 6., 채택확정 : 2005. 3. 18.

김진영 : 동명정보대학교 메카트로닉스공학과(kjy97@tit.ac.kr)

조형석 : 한국과학기술원 기계공학과(hscho@lca.kaist.ac.kr)

그림 1. 시각측정시스템의 구조.

Fig. 1. A schematic of the visual sensing system.

한편 측정시스템의 분해능은 다음과 같이 구해진다.

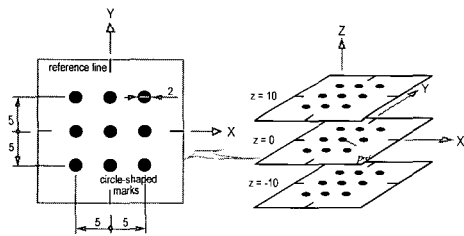
$$R = \frac{V}{n_e} \tag{1}$$

여기서 V 는 측정범위(FOV)의 크기를, n_e 는 V 내의 화소 갯수를 나타낸다. 구현된 측정시스템의 경우 측정범위의 중앙에 위치한 반경 10mm의 원 내부영역에서의 분해능을 표준 분해능 R_s 로 정의하면, R_s 는 약 0.2 mm이다.

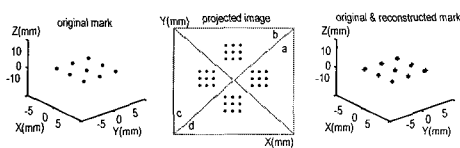
III. 임의 점의 위치 측정

제안된 시스템의 측정오차를 파악하고 이를 통해 측정성능을 검토하기 위해, 그림 2(a)에 보여지는 것처럼 측정영역 내에서 5mm 간격의 9점을 선택하여 10mm 간격의 3개의 높이에서 그들 위치를 측정하는 실험을 통해 실제 위치와의 측정오차를 파악하였다. 몇 개의 측정점에 대한 실험결과만으로 측정범위 전체에 대한 측정성능을 결론짓는 것이 무리라 할지라도 본 논문에서는 편의상 유한 갯수의 위치에 대한 실험을 통해 측정성능을 검토한다. 그림 2(b)는 9개의 측정점에 대한 카메라 영상면에서의 투영영상 및 이로부터 역으로 재구성한 9점의 측정 위치를 보여준다.

표 1은 측정점들의 실제 위치와 측정된 위치 사이의 오차를 보여주는데, 영상면의 네 영역 중 두 영역을 어느 것으로 선택하는가와 측정높이에 따라 구분하여 나타난 것이다. 9점에 대한 측정오차의 평균, 8개의 영역 조합에 대한 평균, 3개의 높이에 대한 평균 등을 보여준다. 여기서 측정높이와 영역 선택에 따른 모든 경우에 대한 측정오차 평균은 약 0.763mm



(a) Test sheet



(b) Projection and reconstruction

그림 2. 임의 점의 위치 측정실험.

Fig. 2. Experimental reconstruction of marks.

표 1. 임의 점의 위치 측정오차.

Table 1. Error in reconstruction of marks.

(unit : mm)									
item	view 'ab'	view 'ba'	view 'bc'	view 'cb'	view 'cd'	view 'dc'	view 'da'	view 'ad'	average of 8 views
z = 0	0.428	0.477	0.568	0.708	0.747	0.677	0.517	0.551	0.584
z = 10	0.665	0.62	0.869	0.934	1.021	0.936	0.471	0.498	0.752
z = -10	0.733	0.899	0.797	0.794	0.78	0.989	1.385	1.258	0.954
average of 3 z-values	0.609	0.665	0.744	0.812	0.849	0.867	0.791	0.769	0.763

이었고, 영역 선택에 따른 최소 평균은 약 0.609mm 이었는데 이들은 카메라 영상면에서의 약 3-4 화소에 해당한다.

IV. 원형부품의 변형형상 측정

조립작업 중에서 가장 기본적이고 대표적인 원형부품의 조립(cylindrical peg-in-hole)을 대상으로 하여 제안된 시스템의 측정성능을 파악하고자 몇 개의 원형부품을 이용하여 측정 실험을 수행한다. 시스템의 측정성능을 보다 정확히 얻기 위하여 그 형상과 치수를 정확히 알 수 있는 단단한 부품(rigid part)을 사용하되, 그림 3에 보여지는 것과 같이 변형 없는 곧은 부품과 비스듬히 경사진 부품을 몇 종류 가공하여 실제 가공된 값과 측정된 값의 차이를 조사한다.

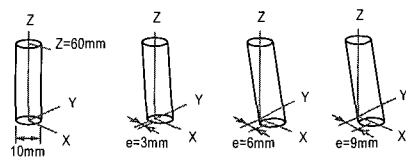


그림 3. 변형 및 상대오차 측정용 원형부품.

Fig. 3. Cylindrical pegs for experiments.

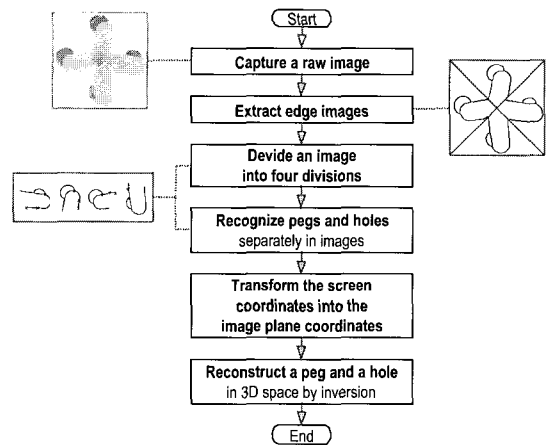


그림 4. 부품변형 및 상대오차 측정 절차.

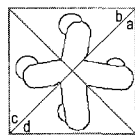
Fig. 4. A procedure to measure part deformation and misalignment.

그림 4는 측정절차를 보여준다. 우선 부품과 구멍의 원시 영상(raw image)으로부터 윤곽선 영상(edge image)을 추출한다. 다음 영상면의 네 영역별로 영상을 4등분한다. 다음 분리된 영상에 대해 부품과 구멍을 구분하여 인식하고, 그 윤곽선 좌표값을 구한다. 다음 화면 좌표계에서 얻어진 좌표값을 카메라 영상면 좌표계에서의 값으로 변환한다. 마지막으로 카메라 영상면 좌표값으로부터 에피폴라(epipolar) 스테레오 방법[6]을 이용하여 부품과 구멍을 3차원 공간상에 재구성(reconstruction)함으로써 원하는 정보를 추출한다.

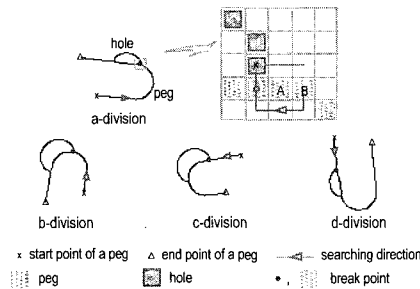
그림 5는 각 영역에서 부품과 구멍을 구분 인식하는 방법을 보여준다. 우선 주어진 영역에서 부품의 시작점(start point)을 찾는다. 시작점으로부터 윤곽선을 따라가면서 분기점(break point)이 나올 때까지 계속 부품의 윤곽선으로 저장한다. 분기점 바로 직전의 점(A-point)에서는 다시 그 직전의 윤곽선 점(B-point)으로부터 시작하여 시계방향으로 분기점 주

위를 탐색하면서 먼저 감지되는 점을 부품에 속하는 점으로, 나중에 감지되는 점을 구멍에 속하는 점으로 저장한다. 진행 방향으로 부품의 윤곽선을 계속 따라가면서 부품의 끝점(end point)에 다다를 때까지 위의 내용을 반복하면서 부품에 해당되는 윤곽선의 모든 점을 저장한다. 한편 구멍에 해당되는 윤곽선은 분기점에서 구멍에 속하는 점으로 저장된 위치로부터 시작하여 부품 윤곽선을 따라가는 것과 같은 방법으로 탐색을 계속하되, 부품에 속하는 점에 다다르면 구멍 윤곽선이 끝난 것으로 한다. 이와 같이 함으로써 구멍에 해당되는 윤곽선을 구할 수 있다.

원형부품의 변형형상은 중심선의 형상에 의해 표현될 수 있으므로 중심선에 대한 3차원 정보를 추출하는 것이 곧 부품의 변형형상을 추출하는 것이다. 그런데 원형부품의 중심선은 2차원 투영영상에서의 중심선으로 투영되기 때문에[7], 2차원 투영영상에서의 부품의 중심선을 구하는 것이 곧 부품변



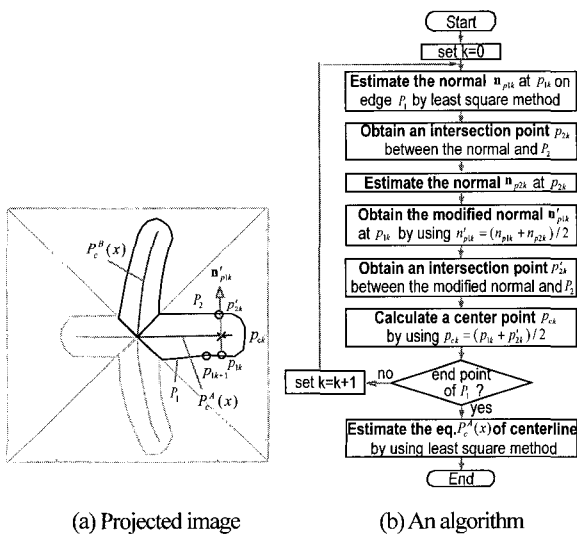
(a) Projected image



(b) Images in each division

그림 5. 부품과 구멍의 구분 인식 방법.

Fig. 5. Division and recognition of a peg and a hole.

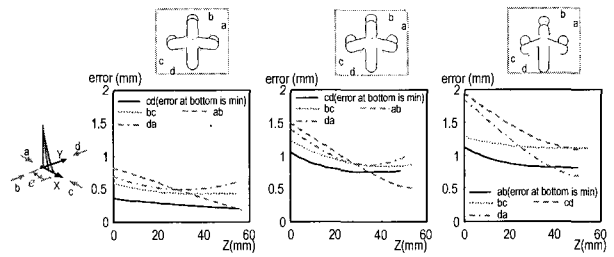


(a) Projected image

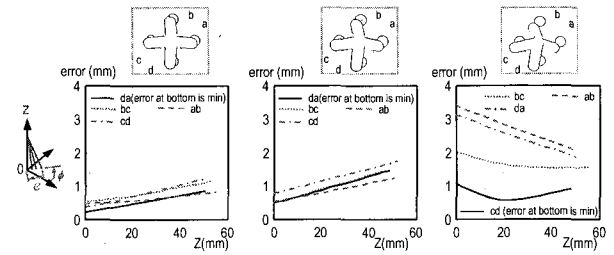
(b) An algorithm

그림 6. 투영영상에서의 부품 중심선 추정 알고리즘.

Fig. 6. An algorithm to estimate a center-line in 2D peg image.



(a) $e = 3mm, \phi = 0^\circ$ (b) $e = 6mm, \phi = 0^\circ$ (c) $e = 9mm, \phi = 0^\circ$



(d) $e = 3mm, \phi = 45^\circ$ (e) $e = 6mm, \phi = 45^\circ$ (f) $e = 9mm, \phi = 45^\circ$

그림 7. 원형부품의 형상 측정오차.

Fig. 7. Experimental results of estimation of peg shape according to the selection of two views.

형을 구하는 시작이다[8]. 그림 6은 2차원 투영영상에서의 부품의 중심선을 추정하는 알고리즘을 보여준다.

그림 7(a),(b),(c)는 시각측정시스템이 측정 대상 부품을 바라보는 방위각 즉 상대오차의 방위각이 $\phi = 0^\circ$ 인 경우에 부품형상을 측정한 결과로써 구멍 중심과 부품 밑면의 중심과의 거리 즉 상대오차의 크기가 $e = 3, 6, 9 \text{ mm}$ 인 경우에 대해 카메라에 투영된 모습과 그로부터 추정된 변형형상의 측정 오차를 영상면의 네 영역 중 두 영역을 어떻게 선택하는가에 따라 보여주고 있다. 여기서 실선으로 표시되어 있는 것은 부품 밑면에서의 측정오차가 가장 작은 것인데, 일반적으로 조립에서는 부품 밑면과 구멍과의 오차가 가장 중요하다. 그림 7(d),(e),(f)는 $\phi = 45^\circ$ 인 경우의 측정오차이다. 그림 7(f)에서는 투영된 영상에서 알 수 있듯이 a와 b영역의 경우 측정 영역의 한계로 인하여 부품의 윤곽선이 일부 보이지 않는다. 따라서 a 또는 b영역을 선택한 경우의 측정오차가 더 크음을 알 수 있는데, 이와 같이 특별히 정보가 누락된 영역을 선택하는 경우가 아니라면 부품변형 측정에 있어서 영역 선택에 따른 차이는 그리 크지 않다.

실험결과를 보면 부품 밑면에서의 측정오차가 가장 작은 경우에 부품 밑면에서의 측정오차는 약 1 mm 이하, 그리고 부품의 길이 전체에 대해서도 측정오차는 약 1.5 mm 이하의 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이는 III장에서의 임의 점의 위치측정 결과와 비교하여 약 2배 또는 그 이내의 오차 값을 나타낸다. 또한 이론적인 표준 분해능 0.2 mm 를 고려하면 최대 5 - 7 화소에 대응하는 측정오차를 보여주는데, 이러한 오차는 불완전한 조명 등으로 인하여 영상에 많은 잡음이 생김으로써 정확한 윤곽선 추출이 안 된 것이 가장 큰 이유이다.

V. 상대오차 측정

1. 상대오차 측정 절차

조립 상대오차는 부품 밀면의 중심과 구멍 중심 사이의 상대거리로 구할 수 있다. 따라서 상대오차 추정 문제는 곧 부품선단의 중심과 구멍의 중심을 찾는 문제로 볼 수 있다. 그런데 부품과 구멍 사이에 필연적으로 발생하는 폐색으로 인해 불완전한 일부만의 정보만으로 중심점을 찾아야 하는데, 이는 제안된 측정장치의 다방향 측정성으로부터 폐색이 가장 적은 영상을 선택함으로써 극복될 수 있다. 상대오차 측정을 위해, 우선 투영 영상으로부터 부품과 구멍을 구분 인식한다. 다음 네 영역에서 두 영역을 선택한 후 에피폴라 구속조건을 이용하여 구멍을 재구성한다. 다음 재구성된 구멍의 법선 교점으로부터 구멍의 중심을 추정한다. 부품 밀면도 역시 원형이므로 같은 방법을 이용하여 부품 밀면의 중심을 추출하면, 구멍 및 부품 밀면의 중심점의 차이로부터 상대오차를 구할 수 있다.

2. 두 영역의 선택 방법

제안된 측정시스템은 폐색이 필연적으로 발생하는 조립 작업에서의 유용성을 높이기 위하여 네 방향에서의 다방향 측정성을 갖고 있다. 따라서 네 방향 영상에 대해 3차원 측정을 위한 두 개의 영상을 선택할 필요가 있는데, 이는 물론 가장 정확한 정보를 얻을 수 있는 두 영상을 선택하는 것이 유리할 것이다. 여기서 가장 정확한 정보를 얻을 수 있다고 하는 것은 일반적으로 가장 많은 정보 즉 부품과 구멍에 대해 가장 많은 부분을 보여주는 영상이라고 할 수 있다. 그런데 실제 조립작업에 있어서 부품의 경우에는 관측 방향에 따라 보이는 부분의 위치가 바뀔 뿐, 그 크기는 크게 변화하지 않는다. 하지만 구멍의 경우에는 부품에 의해 가리워짐이 발생하기 때문에 관측방향에 매우 민감하게 된다. 따라서 두 영상을 선택하는 기준으로써 구멍에 대해서만 고려해도 충분하고, 이에 본 논문에서는 구멍에 대한 정보를 기준으로 두 영역을 선택한다.

두 영상으로부터 스테레오 원리에 의해 3차원 정보를 추출하기 위해서는 각각의 영상이 무조건 많이 보이는 것 보다는 두 영상에서 공통으로 보이는 부분이 많은 것이 중요하다. 따라서 네 개의 영상에서 추출된 구멍의 윤곽선 정보를 가지고, 그 중에서 공통으로 보이는 부분이 가장 많은 두 영상을 선택할 때 구멍 중심의 위치 및 상대오차 정보를 가장 정확하게 추출할 수 있을 것이다. 그림 8은 네 영역 중 두 영역의 선택에 따른 공통으로 보이는 구멍의 윤곽선을 보여주고 있는데, 각각의 경우에 대해 공통으로 보이는 윤곽선의 길이를 조사하여 가장 긴 두 영역을 선택한다.

예를 들어 a-영역과 b-영역에서 각 윤곽선의 처음과 끝에 대응하는 방위각을 $\psi_{as}, \psi_{at}, \psi_{bs}, \psi_{bt}$ 라 할 때, a-영역과 b-영역에서 공통으로 보이는 윤곽선의 처음과 끝에 대응하는 방위각 ψ_s^{ab} 와 ψ_t^{ab} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi_s^{ab} &= \max(\psi_{as}, \psi_{bs}) \\ \psi_t^{ab} &= \min(\psi_{at}, \psi_{bt}) \end{aligned} \tag{2}$$

이로부터 a-영역과 b-영역의 공통 윤곽선의 각도범위 ψ^{ab} [degree]는 다음과 같이 구해진다.

$$\psi^{ab} = \begin{cases} 0 & \text{if } \psi_t^{ab} - \psi_s^{ab} < 0 \\ \psi_t^{ab} - \psi_s^{ab} & \text{if } 0 \leq \psi_t^{ab} - \psi_s^{ab} \leq 360 \\ \psi_t^{ab} - \psi_s^{ab} - 360 & \text{if } 360 < \psi_t^{ab} - \psi_s^{ab} \end{cases} \tag{3}$$

즉 가장 긴 윤곽선이 가장 큰 각도범위를 갖게 되므로 영역선택에 따른 공통 윤곽선의 각도범위를 조사함으로써 원하는 두 영역을 선택할 수 있다.

3. 구멍 중심 추정 알고리즘

폐색에 의해 일부 정보가 누락된 구멍에서 중심을 추정하기 위한 알고리즘이 그림 9에 보여지는데, 이는 원의 법선들이 한 점 즉 원의 중심에서 만난다는 사실을 이용한다. 하지만 영상처리에 의해 재구성된 구멍 윤곽선은 영상 잡음 또는

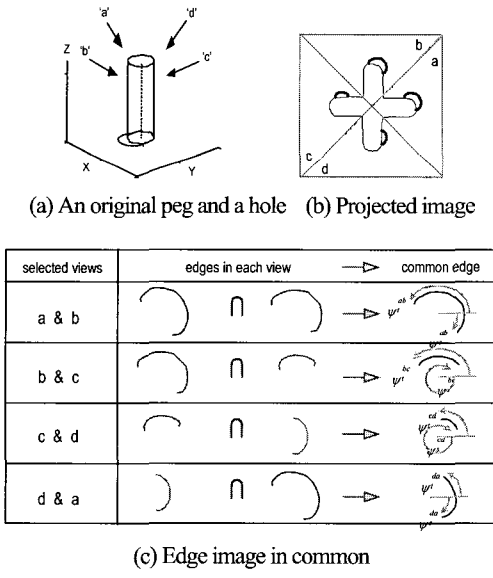


그림 8. 네 영역 중 두 영역의 선택 방법.
Fig. 8. Selection of two images out of the four.

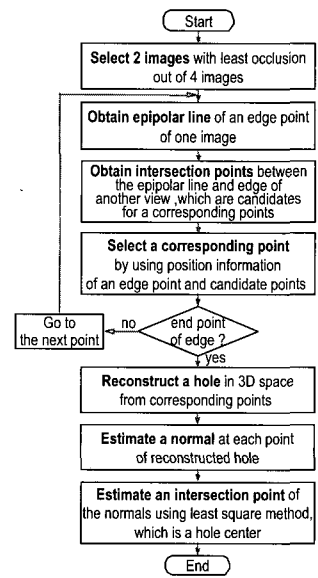


그림 9. 구멍 중심 추정 알고리즘.
Fig. 9. An algorithm to estimate a hole center.

각종 영상처리 오차 등으로 인하여 대개 완전한 원이 되지 않기 때문에 각 법선들이 한 점에서 만나지 않는다. 따라서 한 점에서 만나지 않는 각 법선들의 근사화된 공통 교점을 추출하기 위하여 최소자승법(least square method)을 이용한다.

N 개의 법선 $\ell_{n1}, \dots, \ell_{nN}$ 의 교점 $c_h = (x_h, y_h)^T$ 는 임의의 점으로부터 i 번째 법선 ℓ_{ni} 까지의 거리 d_{ni} 에 의해 계산되는 거리함수 f_{dh} 를 최소로 하는 점이다. 법선 ℓ_{ni} 의 방정식이 $a_i x + b_i y = c_i$ 로 주어진다면 f_{dh} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_{dh} = \sum_{i=1}^N d_{ni}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(a_i x + b_i y - c_i)^2}{(a_i^2 + b_i^2)} \quad (4)$$

(4)를 x 와 y 에 관해서 미분하면 f_{dh} 를 최소로 하는 교점 즉 구멍의 중심을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c_h = M_{ch}^{-1} \cdot N_{ch} \quad (5)$$

여기서,

$$M_{ch} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{a_i^2}{(a_i^2 + b_i^2)} & \sum_{i=1}^N \frac{a_i b_i}{(a_i^2 + b_i^2)} \\ \sum_{i=1}^N \frac{a_i b_i}{(a_i^2 + b_i^2)} & \sum_{i=1}^N \frac{b_i^2}{(a_i^2 + b_i^2)} \end{bmatrix}, \quad N_{ch} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{a_i c_i}{(a_i^2 + b_i^2)} \\ \sum_{i=1}^N \frac{b_i c_i}{(a_i^2 + b_i^2)} \end{bmatrix}$$

이다.

한편 원형부품의 경우 밀면도 결국 원형이므로 부품 밀면의 중심점은 위의 구멍 중심 추정 알고리즘과 같은 방법으로 얻어질 수 있다. 단 부품의 밀면은 구멍 표면과 같이 일정한 높이의 수평면상에만 놓이는 것이 아니라, 3차원 공간에서 임의의 위치와 방향으로 놓여질 수 있기 때문에 2차원이 아닌 3차원 공간상에서의 직선의 교점을 구해야 한다. 즉 법선의 방정식과 교점을 3차원 공간에서 정의하는 것을 제외하면 위의 구멍에 대한 법선 교점 추출방법과 동일하다.

5. 실험 결과

상대오차의 방향각을 ϕ , 상대오차의 크기를 e 라 할 때, 그림 10(a)는 $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ 인 경우에 e 의 값이 $0mm$ 에서 $3, 6, 9mm$ 로 변화함에 따라 부품 밀면의 중심을 측정된 결과로써, 영상면의 네 영역 중 두 영역의 선택에 따른 측정오차의 최대값과 최소값을 보여주고 있는데, 최소값의 경우 그 측정오차는 약 $1mm$ 이하임을 알 수 있다. 그림 10(b)는 같은 조건에서 부품의 기울기를 측정된 결과로써 최소값의 경우 측정오차는 약 0.7° 이내임을 알 수 있다.

그림 11(a)는 그림 10과 마찬가지로 $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ 인 경우에 e 의 값이 $0mm$ 에서 $3, 6, 9mm$ 로 변화함에 따라 구멍의 중심을 측정된 결과로써 영상면의 네 영역 중 두 영역의 선택에 따른 최대값과 최소값 그리고 공통부분이 가장 많은 두 영상을 선택했을 때의 값을 보여주고 있다. 즉 고정된 위치에 있는 구멍이 부품에 의하여 가리워질 때 폐색량에 따른 구멍의 중심 측정 결과로써 영상면의 네 영역에 대응하는 네 개의 영상 중에서 어느 영상을 선택하느냐에 따라 오차의 크기가 변화하는데, 여기서 최소값의 경우 측정오차는 $\phi = 0^\circ$ 일 때 약 $1mm$ 이내, $\phi = 45^\circ$ 일 때 약 $1.6mm$ 이내의 범위에 있음을 알 수 있다.

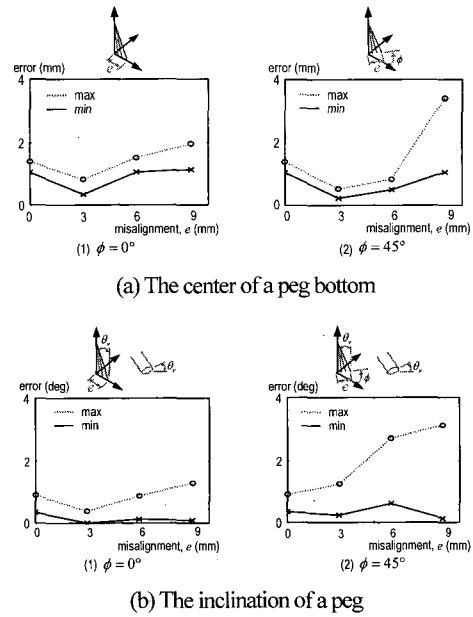


그림 10. 부품 밀면의 중심 및 기울기 측정오차.

Fig. 10. The measurement results of the center and the inclination of a peg bottom.

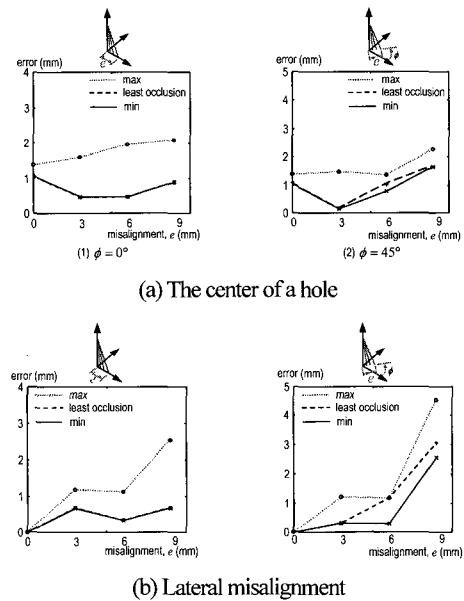


그림 11. 상대오차의 측정오차.

Fig. 11. The measurement results of misalignment.

그림 11(b)는 구멍의 중심점과 부품 밀면의 중심점 측정결과로부터 상대오차의 크기를 구한 결과로써, 두 영역의 선택에 따른 최대값과 최소값 그리고 공통부분이 가장 많은 두 영상을 선택했을 때의 값을 보여주고 있다. 측정오차는 $\phi = 0^\circ$ 의 경우에 약 $0.6mm$ 이하, $\phi = 45^\circ$ 의 경우에는 약 $2.5mm$ 이하임을 알 수 있다. 그림 11(b)에서 $\phi = 45^\circ, e = 9mm$ 인 경우에 상대오차가 매우 커진 것은 IV장의 그림 7(f)와 마찬가지로 측정영역의 한계로 인하여 부품의 윤곽선 정보가 일부 누락되어 부품 밀면의 중심점 추출이 제대로 안 되었기 때문이다. 이와 같은 경우를 제외하면 상대오차 측정오차에

서 두 영역의 선택에 따른 최소값은 약 $0.6mm$ 이내인데, 이는 카메라 영상면에서의 3 화소에 해당한다. 이러한 측정오차는 앞에서 기술한 바와 같이 불완전한 조명 등에 의한 영상 잡음으로 인해 정확한 윤곽선 추출이 안 된 것이 가장 큰 이유이다. 한편 이상의 실험결과에서 알 수 있듯이 네 개의 영상 중에서 어느 영상을 선택하느냐에 따라 오차의 크기가 변화하는데, 이로부터 제안된 측정시스템은 폐색이 발생하는 경우에 더욱 유용함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 유연부품조립용으로 제안된 시각측정시스템을 이용하여 유연한 원형단면 부품조립에서의 부품변형 및 상대오차를 측정하기 위한 알고리즘을 제안하고, 측정실험을 수행하였다. 우선 임의 점의 위치측정을 통해 시스템의 이론적 성능과 실제 측정성능을 비교하고, 부품변형으로서의 부품형상 및 상대오차 측정을 위해 부품과 구멍을 서로 구분 인식하는 알고리즘, 원형부품의 중심선 추정 알고리즘, 한 장의 영상에 포함된 네 구역 중 두 구역을 선택하는 알고리즘, 폐색된 구멍의 중심 추정 알고리즘 등을 제안하고, 이를 토대로 부품형상 및 상대오차 측정실험을 수행하였다. 측정시스템의 설계사양에 기초한 표준 분해능 $0.2mm$ 를 기준으로 할 때, 임의 점의 위치 측정오차는 3 - 4 화소, 부품형상 측정오차는 5 - 7 화소, 상대오차의 측정오차는 약 3 화소 이내로써, 제안된 알고리즘과 시스템이 유연부품조립에 유효함을 확인하였다.

김진영

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 10 권 제 7 호 참조

참고문헌

- [1] H. S. Cho, H. J. Warnecke and D. G. Kwon, "Robotic assembly: a synthesizing overview," *Robotica*, vol. 5, pp. 153-165, 1987.
- [2] W. S. Kim and H. S. Cho, "A new omnidirectional image sensing system for assembling parts with arbitrary cross-sectional shapes," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 3, no. 4, pp. 275-292, 1998.
- [3] H. Inoue and H. Inaba, "Hand-eye coordination in rope handling," *The 1st Int. Sym. on Robotics Research*, pp. 163-174, 1985.
- [4] H. Nakagaki, K. Kitagaki, T. Ogasawara and H. Tsukune, "Study of insertion task of a flexible wire into a hole by using visual tracking observed by stereo vision," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3209-3213, 1996.
- [5] J. Y. Kim, H. S. Cho, and S. Kim, "A visual sensing system for measuring parts deformation and misalignments in flexible parts assembly," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 30, no. 5, pp. 379-401, 1998.
- [6] A. R. J. Francois, G. G. Medioni and R. Waupotitsch, "Mirror symmetry: 2-view stereo geometry," *Image and vision computing*, vol. 21, no. 2, pp. 137-143, 2003.
- [7] N. Pillow, S. Utcke and A. Zisserman, "Viewpoint-invariant representation of generalized cylinders using the symmetry Set," *Image and Vision Computing*, vol. 13, no. 5, pp. 355-365, 1995.
- [8] J. Y. Kim, H. S. Cho, and S. Kim, "Measurement of parts deformation and misalignments by using a visual sensing system," *IEEE Int. Sym. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 362-267, 1997.

조형석

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 7 호 참조