

시각센서를 이용한 부품변형 및 상대오차 측정 실험

Experiments for measuring parts deformation and misalignments using a visual sensor

°김진영*, 조형석**, 김성권***

*한국과학기술원 자동차 및 설계공학과(Tel: +2-958-3461; Fax: +2-968-1638; E-mail: kji@lca.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 기계공학과 (Tel: +42-869-3213; Fax: +42-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

***삼성전자 생산기술센터 (Tel: +331-200-2200; Fax: +331-200-2420)

Abstracts Flexible parts comparing with rigid parts can be deformed by contact force during assembly. For successful assembly, information about their deformation as well as possible misalignment between mating parts is essential. However, because of the complex relationship between parts deformation and reaction forces, it is difficult to acquire all required information from the reaction forces alone. In this paper, we measure parts deformation and misalignments by using the visual sensing system presented for flexible parts assembly. Experimental results show that the system can be effectively used for detecting parts deformation and misalignments between mating parts.

Keywords Assembly, Visual sensor, Part deformation, Misalignment, Flexible part

1. 서론

유연부품을 조립하는 경우에는 자중 또는 조립 반력에 의해 부품변형이 발생하기 때문에 힘 센서에 의해 측정된 조립 반력만에 의해 상대오차를 알아내기 어렵다. 따라서 유연부품을 성공적으로 조립하기 위해서는 부품변형 및 상대오차를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 필요한데, 이는 시각센서에 의해 이루어질 수 있다.

시각센서를 이용하여 유연부품을 조립하는 연구로서 우선 Inoue 등[2]은 로우프를 링에 삽입하는 작업을 대상으로 로우프 선단과 링의 중심을 측정하였는데, 이 연구에서는 로우프에 비해 링의 직경이 훨씬 크기 때문에 로우프에 의한 링의 폐색(occlusion)이 무시되었다. Nakagaki 등[6]은 전선의 삽입 작업을 대상으로 전선의 변형형상을 측정하였는데, 전선의 선단이 구멍 표면에 수직하고, 또한 구멍의 위치는 미리 알고있는 것으로 가정하였다. Chen 등[1]은 한쪽 끝이 고정되어 있고 자중에 의해서만 처짐이 발생하는 유연 보의 변형측정을 통해 보의 변형 특성을 추출하고 이로부터 변형량을 추정하였다.

이상의 연구 현황에서 알 수 있듯이 임의 방향으로 변형 가능한 유연부품을 조립하기 위하여 부품변형 및 상대오차를 모두 측정하면서 조립을 시도한 예는 없었다. 그러나 유연부품조립은 3차원 공간상의 부품변형과 더불어 부품과 폐색된 구멍(occluded hole) 사이의 상대오차를 측정해야 하고 따라서 이를 효과적으로 수행하기 위한 측정방법에 관한 연구가 필요하다.

Kim 등[3]은 이를 위하여 하나의 카메라와 몇 개의 거울로 이루어진 시각 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 한 장의 영상만으로 3차원 측정이 가능할 뿐 아니라 폐색도 극복할 수 있기 때문에 측정 시간이 단축되고, 또한 로봇에 쉽게 부착하여 사용할 수 있도록 되어있다.

본 연구에서는 앞에서 제안된 측정 시스템을 이용하여 원형 단면을 갖는 부품(이하 원형 부품이라 부른다)의 조립 작업에 있어서 부품 변형 및 상대오차를 측정하고자 한다. 우선 캘리브레이션된 시스템의 시스템의 측정오차 파악을 위하여 공간상의 임의 점의 위치 측정 실험을 수행한 후 원형 부품의 변형 및 상대오차 추정 알고리즘[4]을 이용하여 부품의 변형형상 및 상대오차를 측정하는 실험을 수행하고자 한다.

2. 시각 측정 시스템

그림 1(a)는 제안된 측정 장치의 기본 구조로서 한대의 카메라와 두개의 평면거울(plane mirror), 두개의 사각뿔거울(pyramidal mirror) 그리고 부품을 파지하기 위한 핸드(hand)로 이루어져 있는데, 한대의 카메라로 부품의 3차원 변형형상을 측정하기 위하여 그림 1(b)와 같은 원리로 두개의 거울에 비친 영상을 조합하여 이로부터 부품 변형에 관한 3차원 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

외측 사각뿔거울(outer pyramidal mirror)은 사각뿔(frustum), 내측 사각뿔거울(inner pyramidal mirror)은 사각뿔(pyramid)의 형상을 하고 있는데, 그림 1(a)에 보여진 것처럼 측정 대상물의 임의의 한 점에서 출발한 빛은 먼저 외측 사각뿔거울의 내부 4개면에 투영되고 이로부터 내측 사각뿔거울의 대응하는 4개면을 거쳐 위로 향하게 된다. 그림 1(c)는 제안된 시스템에 의해 카메라에 투영된 영상의 예로서 사각뿔거울의 4개면에 대응하여 영상면이 4분할 되어있음을 알 수 있다.

앞에서 설명했듯이 사각뿔거울의 4개면에 비친 영상이 하나

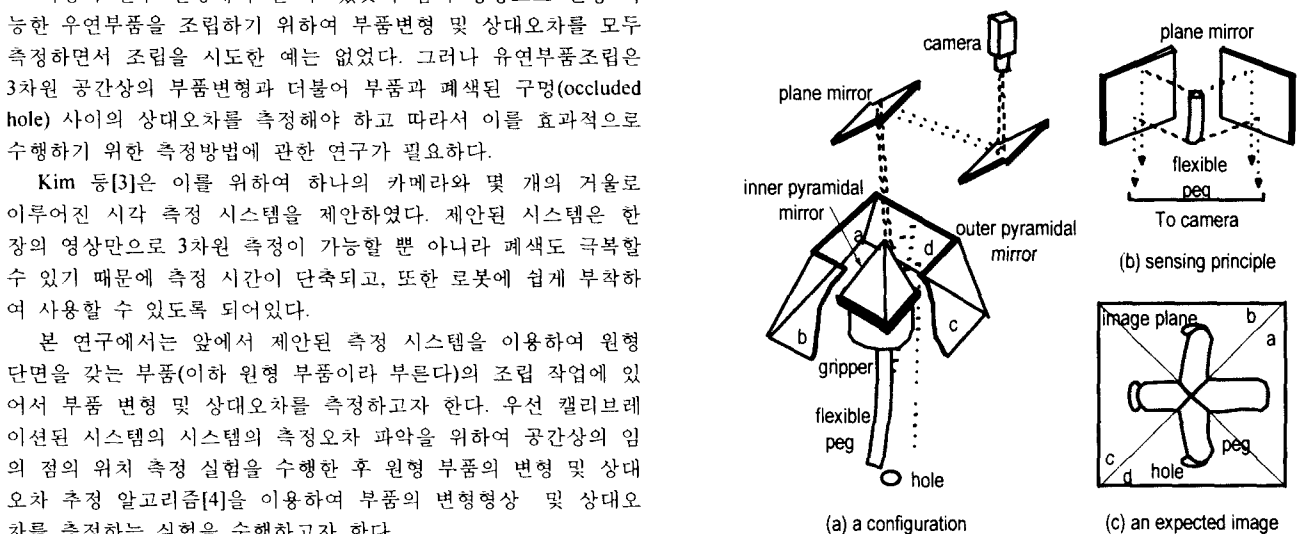


그림 1 제안된 측정 시스템
Fig. 1 Sensing system schematic

표 1 다중거울 시스템과 다중카메라 시스템
Table 1 Comparison of multi-mirror system and multi-camera system for three-dimensional measurement

item	multi-mirror system	multi-camera system
no. of required image	$n_i = 1$	$n_i \geq 2$
no. of camera necessary to overcome occlusion	$n_c = 1$	$n_c = 4$
measurement time	rapid	time-consuming
weight and size	light and compact	heavy and bulky
attachment to robot	easy	difficult
resolution	large	small

의 카메라에 투영됨으로써, 결국 4대의 카메라를 사용한 것과 같은 효과를 얻고 있다. 스테레오 비전을 이용하기 위해서는 두 대의 카메라 즉 거울 두개면만 있으면 되지만, 사각뿔의 4개면을 모두 이용함으로써 사각뿔의 두 면 만에 의해서는 보이지 않는 반대편에 대한 정보까지 이용할 수 있도록 함으로써 폐색(occlusion)에 의한 정보 누락을 방지하는 전방향 측정성(omni-directional sensing)을 갖고 있다.

제안된 시스템과 같은 다중 거울 시스템은 표 1에 보여지는 것처럼 다중 카메라 시스템에 비해 많은 장점을 갖고 있다.

3. 캘리브레이션

측정 시스템을 이용하여 대상 물체를 측정하는 경우에 측정 정도를 향상시키기 위해서는 시스템의 캘리브레이션이 이루어져야 한다. 본 연구에서 제안되어진 시스템의 경우에도 카메라와 다중 거울계의 캘리브레이션이 이루어져야 하는데, 이는 카메라와 거울들의 설치 위치 및 각도 등의 실제 값을 측정함으로써 설계값과의 오차를 보정해 주는 것을 의미한다. 즉 그림 2에 보여지는 것처럼 카메라와 내측 사각뿔 거울사이의 캘리브레이션, 내측 사각뿔 거울과 외측 사각뿔 거울이의 캘리브레이션, 내측 사각뿔 거울과 외측 사각뿔 거울 사이의 캘리브레이션을 통해 카메라와 거울들 사이의 상대위치 보정이 이루어질 수 있는데, 그 구체적인 방법은 지면 관계상 생략하고자 한다.

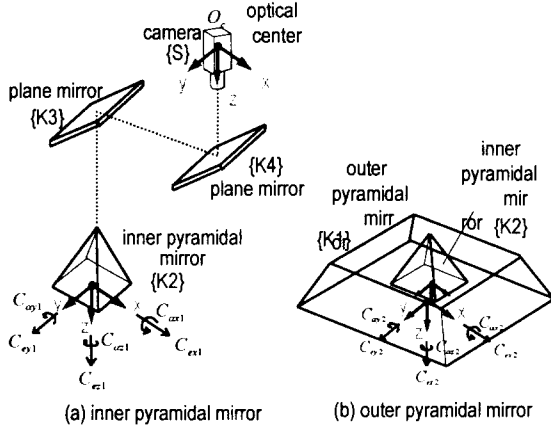


그림 2 제안된 시스템의 캘리브레이션
Fig. 2 Calibration parameters of the proposed system

4. 부품변형 및 상대오차 측정

4.1 임의 점의 위치 측정

시각 측정 시스템에서는 비록 캘리브레이션 되었다 할지라도 시각센서의 분해능, 조명 및 대상물체 그리고 외부환경에 의한 영상의 불확실함, 캘리브레이션 오차 등에 의해 측정오차가 존재한다. 제안된 시스템의 경우에도 조명의 불완전함으로 인하여 깨끗한 영상이 아닌 잡음(noise)이 많이 섞인 영상이 얻어지게 되고 이로인하여 정확한 정보 추출이 곤란하게 된다. 또한 시스템이 갖는 분해능의 한계, 캘리브레이션 오차 등이 합해져서 측정오차가 발생하게 되는데, 위치를 알고 있는 임의 점의 위치를 측정함으로써 시스템에 의한 측정오차가 어느정도 되는지를 파악하고 이를 통해 시스템의 측정 성능을 평가할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 그림 3에 보여지는 것처럼 측정영역 내에서 5mm 간격의 9 점을 선택하여 측정거리가 497.7mm 인 수평면인 기준평면 상에서, 그리고 기준평면보다 10mm 높은 곳과 10mm 낮은 곳에서 각각 측정하는 실험을 통해 측정거리를 파악하였다. 그림 3은 기준평면 상의 9 점에 대한 카메라 영상면에서의 투영 영상 및 역으로 구한 9 점의 측정 위치를 보여준다.

그림 4는 그림 3에서의 카메라 영상면에서의 실제 투영위치와 거울의 보정된 위치로부터 이론적으로 계산된 위치와의 오차를 각각의 점에 대해 측정높이에 따라 그리고 영상면에서의 투영영역에 따라 구분하여 나타낸 것인데, 이들 모두의 평균치는 약 0.027mm 로써 2 화소(pixel) 정도에 해당한다.

그림 5는 측정점들의 3 차원 공간상의 실제 위치와 시스템에

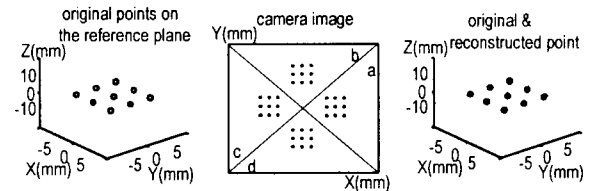


그림 3 임의 점의 위치 측정
Fig. 3 Experimental projection and reconstruction of points

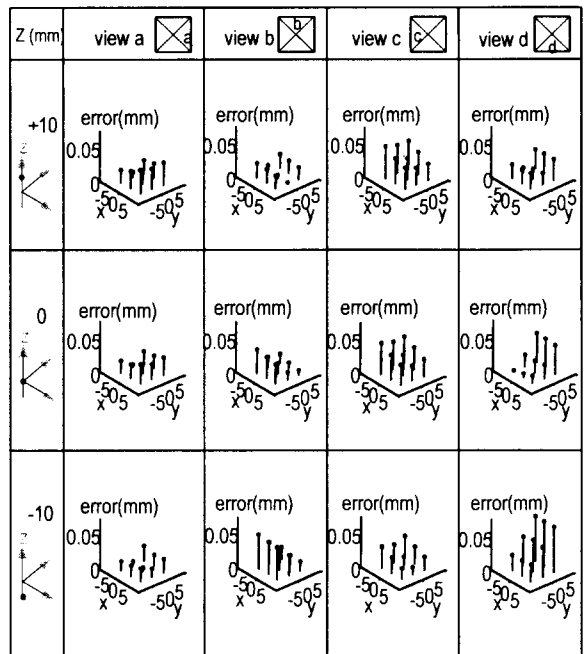


그림 4 영상면의 각 영역에서의 임의 점의 투영 오차
Fig. 4 Error in projection of points

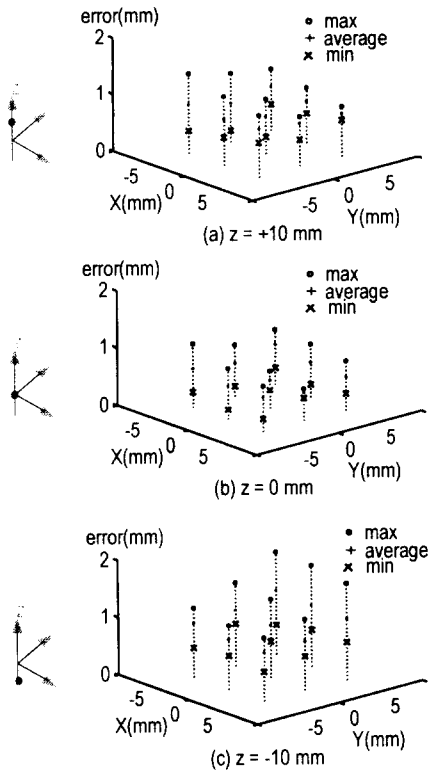


그림 5 영상면의 두 영역 선택에 따른 임의 점의 위치 측정오차
 Fig. 5 Error in reconstruction of points according to the selection of two views

의해 측정된 위치 사이의 오차를 보여주는데, 영상면의 네 영역 중 두 영역을 어느 것으로 선택하느냐에 따른 최대값과 최소값 그리고 영역선택에 따른 모든 경우의 평균값을 보여준다. 여기서 측정 높이와 영역선택에 따른 모든 경우에 대한 측정점들의 측정오차 평균은 약 0.763mm 이다.

4.2 원형 부품의 변형형상 측정

원형 단면을 갖는 원형 부품의 조립(cylindrical peg-in-hole)이

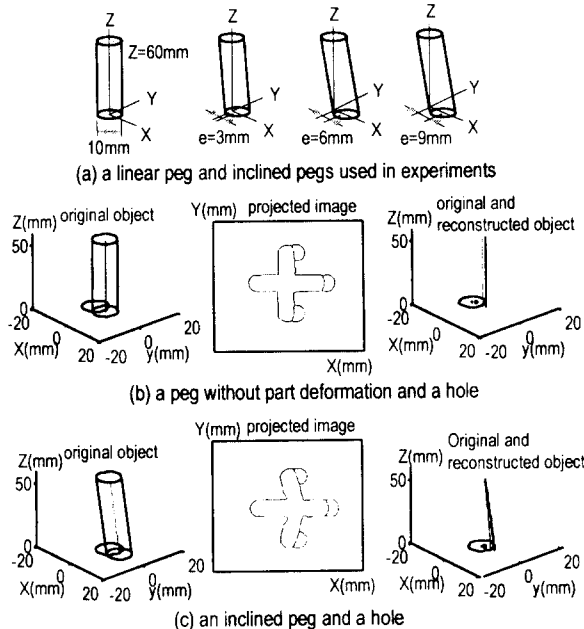


그림 6 원형부품 조립시의 변형형상 및 상대오차 측정
 Fig. 6 Experimental projection and reconstruction of a peg and a hole

조립작업 중에서 가장 기본적이고 대표적인 작업이기 때문에[6] 본 연구에서는 원형 부품을 단단한 구멍에 조립하는 작업을 대상으로 제안된 시스템의 측정 성능을 파악하고자 몇 개의 원형 썩(cylindrical peg)과 구멍(hole)을 가공하여 실제 측정실험을 수행하였다. 원형 부품의 변형형상은 중심선의 형상으로부터 그리고 상대오차는 구멍중심과 부품 밑면의 중심 사이의 차이로부터 추정하였는데, 그 구체적인 방법은 [4]에서 제안된 알고리즘을 이용하였다.

제안된 시스템의 측정성능으로써 측정오차를 파악하기 위하여 변형이 없는 선형 썩(linear peg)과 임의의 기울기로 비스듬히 경사진 썩(inclined peg)을 몇 종류 가공하여 썩의 변형형상 및 상대오차를 측정함으로써 실제 가공된 값과 측정된 값의 차이를 알아 보았다. 그림 6(a)는 실험에 사용된 썩들의 치수를 보여주었고, 그림 6(b)와 6(c)는 선형 썩과 경사진 썩에 대해 주어진 물체의 원래 모습과 카메라에 투영된 모습, 그리고 투영된 모습으로부터 제안된 알고리즘에 의해 3 차원 공간 상에 재구성한 모습을 보여주고 있다.

그림 7(a), (b), (c)는 시각 측정 시스템이 측정 대상부품을 바라보는 방위각이 $\phi = 0^\circ$ 인 경우에 부품의 형상을 측정한 결과로써 구멍 중심과 부품 밑면의 중심과의 거리가 $e=3, 6, 9\text{mm}$ 인 경우에 대해 카메라에 투영된 모습과 그로부터 추정된 변형형상의 측정오차를 영상면의 네 영역 중 두 영역의 선택에 따라 어떻게 되는지 보여주고 있다. 여기서 굵은 선으로 표시되어 있는 것은 부품 밑면에서의 측정오차가 가장 작은 것으로써 일반적으로 조립의 경우 부품 밑면과 구멍과의 오차가 가장 중요하기 때문이다. 그림 7(d), (e), (f)는 $\phi = 45^\circ$ 인 경우의 측정 오차이다. 측정된 실험조건에서의 실험결과를 보면 굵은 선으로 표시된 경우에 부품 밑면에서의 측정오차는 약 1mm 이하, 그리고 부품의 길이 전체에 대해서도 측정오차는 약 1.5mm 이하의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

4.3 상대오차 측정

조립 시의 상대오차는 구멍의 중심점과 부품 밑면의 중심점 사이의 상대오차로 정의되고 따라서 조립 상대오차는 구멍의 중심점 추정, 부품 밑면의 중심점 추정을 통하여 이루어 질 수 있는데, 그 구체적인 알고리즘은 [4]의 방법을 이용하였다.

그림 8 은 $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ 인 경우에 e 의 값이 0mm 에서 $3, 6, 9\text{mm}$ 로 변화함에 따라 부품 밑면의 중심을 추정한 결과로써, 영상면의 네 영역 중 두 영역의 선택에 따른 측정오차의 최대값과 최소값을 보여주고 있는데, 최소값의 경우 그 측정오차는 약

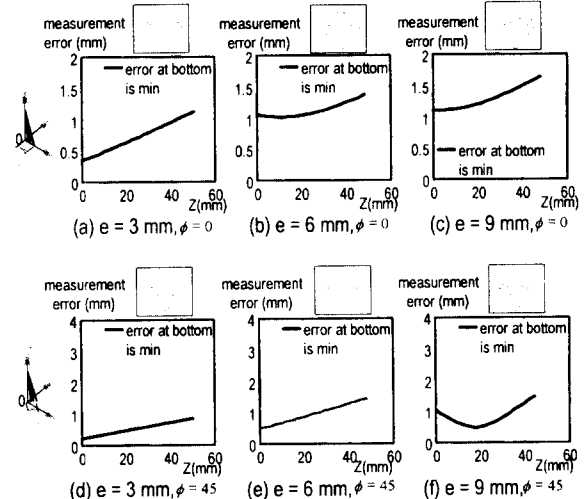


그림 7 영상면의 두 영역 선택에 따른 원형부품의 형상측정 오차
 Fig. 7 Experimental results of estimation of peg shape according to the selection of two views

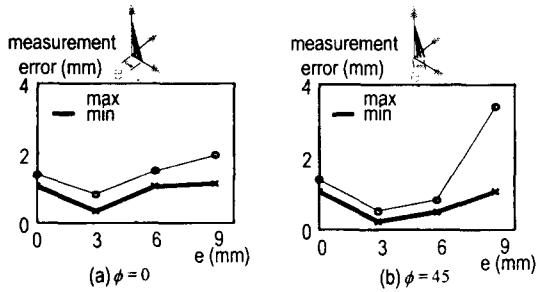


그림 8 부품 밑면의 중심 추정 오차
Fig. 8 Experimental results of estimation of the center of peg bottom

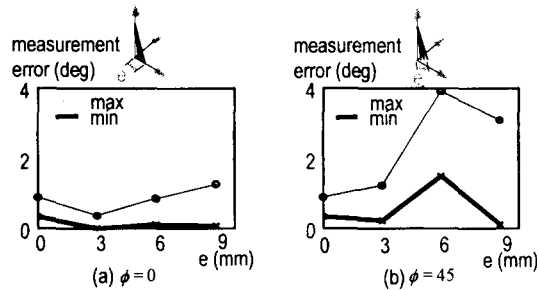


그림 9 부품의 기울기 추정 오차
Fig. 9 Experimental results of estimation of the inclination of peg bottom

1mm 이하임을 알 수 있다. 그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 부품의 기울기를 추정한 결과로써 최소값의 경우 측정오차는 1.5° 이내임을 알 수 있다.

그림 10은 그림 8과 같은 조건에서 구멍의 중심을 추정한 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 폐색량(occluded area)에 따른 구멍의 중심 추정 결과로써 영상면의 네 영역에 대응하는 네 개의 영상 중에서 어느 영상을 선택하느냐에 따라 오차의 크기가 크게 변화함을 알 수 있는데, 여기서 최소값의 경우 측정오차는 $\phi = 0^\circ$ 에서는 약 1mm 이하, $\phi = 45^\circ$ 에서는 약 1.6mm 이내의 범위에 있음을 알 수 있다.

그림 11은 그림 8과 같은 조건에서 구멍의 중심점과 부품 밑면의 중심점 측정을 통해 평면 상의 상대오차를 측정된 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 10, 11의 결과에서 알 수 있듯이 네 개의 영상 중에서 어느 영상을 선택하느냐에 따라 오차의 크기가 크게 변화하는데, 이로부터 폐색(occlusion)이 발생하는 경우에 제안된 측정 시스템은 더욱 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 유연부품조립을 위해 제안된 시각 측정 시스템을 이용하여, 원형 단면을 갖는 부품의 조립작업에 있어서 부품의 변형영상 및 상대오차를 측정하였다. 측정 시스템의 측정 성능을 파악하고자 우선 위치를 알고 있는 임의의 점의 위치를 측정하는 실험을 수행하였는데, 측정 점들의 측정오차 평균은 약 0.76mm이었다. 그리고 [4]에서 제안된 알고리즘을 이용하여 원형 부품의 변형영상 및 상대오차 측정 실험을 수행하였는데, 변형영상의 경우 시스템의 측정범위 내에서는 측정오차가 약 1.5mm 이하이었다. 한편 상대오차의 경우에는 영상면의 네 영역

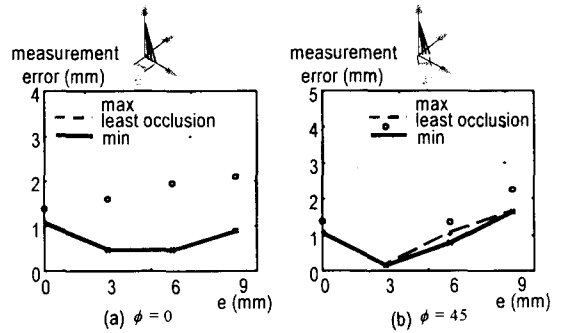


그림 10 구멍의 중심 추정 오차
Fig. 10 Experimental results of estimation of centers of occluded holes

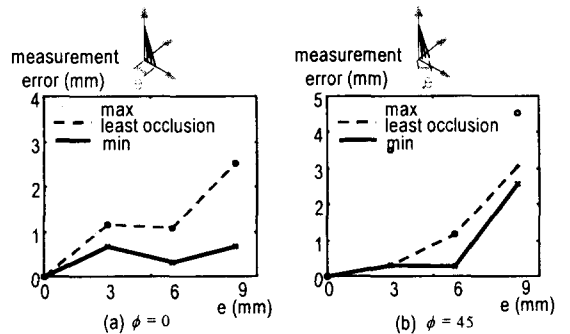


그림 11 상대 위치오차의 추정 오차
Fig. 11 Experimental results of estimation of lateral misalignment

중에서 어느 영역의 영상을 선택하느냐에 따라 오차의 크기가 크게 변화함을 알 수 있었는데, 최소값의 경우에 구멍 중심의 측정오차는 약 1.6mm 이하이었고 평면상의 상대오차는 약 2.5mm 이하이었다.

시스템의 측정오차는 주로 조명 및 대상물체 그리고 외부환경에 의한 영상의 불확실함, 시스템이 갖는 분해능의 한계로 인하여 발생하는데, 실험 결과는 제안된 시스템이 부품변형 및 상대오차 측정에 유용하게 사용될 수 있고, 특히 네 영상 중 어느 영상을 선택하느냐에 따라 오차크기가 변화하는 것으로부터 폐색이 발생하는 조립 작업 시에 제안된 시스템은 더욱 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] C. Chen and Y. F. Zheng, "Deformation Identification and Estimation of One-Dimensional Objects by Vision Sensors", *J. of Robotic Systems*, Vol. 9, No. 5, pp. 595-612, 1992.
- [2] H. Inoue and H. Inaba, "Hand-Eye Coordination in Rope Handling", *The 1st Int. Sym. on Robotics Research*, pp. 163-174, 1985.
- [3] J. Y. Kim, H. S. Cho, and S. Kim, "A Visual Sensing System with Multi-views for Flexible Parts Assembly", *The 8th Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 979-984, 1997.
- [4] 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.
- [5] 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, pp. 1996.
- [6] J. L. Nevins and D. E. Whitney, "Assembly Research", *The Industrial Robot*, March, pp. 27-43, 1980.