

마이크로/나노 핸들링을 위한 마이크로 로봇틱 플랫폼: 비전 기반 3 자유도 절대위치센서 개발

A Micro-robotic Platform for Micro/nano Assembly: Development of a Compact Vision-based 3 DOF Absolute Position Sensor

이재하^{1,✉}, Jean Marc Breguet², Reymond Clavel³, 양승한⁴
Jae-Ha Lee^{1,✉}, Jean Marc Breguet², Reymond Clavel³ and Seung-Han Yang⁴

1 텍사스주립대(알링턴) 자동화로봇연구소 (Automation & Robotics Research Institute, University of Texas, Arlington)

2 CSEM (The Swiss Center for Electronics and Microtechnology)

3 스위스연방공대(로잔) (Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne)

4 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.)

✉ Corresponding author: jhlee@uta.edu, Tel: +1(817)272-5900

Manuscript received: 2009.8.13 / Revised: 2009.11.11 / Accepted: 2009.11.11

A versatile micro-robotic platform for micro/nano scale assembly has been demanded in a variety of application areas such as micro-biology and nanotechnology. In the near future, a flexible and compact platform could be effectively used in a scanning electron microscope chamber. We are developing a platform that consists of miniature mobile robots and a compact positioning stage with multi degree-of-freedom. This paper presents the design and the implementation of a low-cost and compact multi degree of freedom position sensor that is capable of measuring absolute translational and rotational displacement. The proposed sensor is implemented by using a CMOS type image sensor and a target with specific hole patterns. Experimental design based on statistics was applied to finding optimal design of the target. Efficient algorithms for image processing and absolute position decoding are discussed. Simple calibration to eliminate the influence of inaccuracy of the fabricated target on the measuring performance also presented. The developed sensor was characterized by using a laser interferometer. It can be concluded that the sensor system has submicron resolution and accuracy of $\pm 4\mu\text{m}$ over full travel range. The proposed vision-based sensor is cost-effective and used as a compact feedback device for implementation of a micro robotic platform.

Key Words: Absolute Position Sensor (절대위치센서), Electro Luminescence Foil (전계형광박막), Experimental Design (실험계획법), Image Sensor (이미지 센서), Micro-robotic Platform (마이크로로봇틱 플랫폼)

1. 서론

수 마이크로에서 수 밀리미터 크기의 부품 조립이 요구됨에 따라 초소형 부품 조립과 특성 평가, 핸들링을 위한 플랫폼에 대한 관심이 증대되고 있다. 유럽연합 프로젝트 일환으로 현미경 뷰

영역 내에서 작동하는 마이크로 로봇틱 플랫폼이 개발 중에 있다. 이러한 다용도의 유연한 플랫폼은 부품 조립의 정밀도뿐만 아니라 결합력, 점착력 등의 물리적 특성을 평가하는 데도 사용될 수 있다. 플랫폼은 여러 개의 매니퓰레이터와 마이크로 그리퍼, 마이크로 피펫 같은 마이크로 기구들

로 구성된다. 마이크로 구동을 위한 매니플레이터들이 이미 상용화 되어 있지만 유연성이 떨어지거나 크기의 한계로 현미경 뷰 영역과 같은 제한된 공간에 적용하기가 힘들다. 개발하는 플랫폼은 평판 구조의 마이크로 이송기구와 모바일 마이크로 로봇으로 구성된다. 플랫폼 외부는 온도, 습도 및 압력을 조절할 수 있는 챔버로 구성된다. 평판 구조의 마이크로 이송기구는 3 개의 일체화 된 푸쉬-풀 타입 피에조 액추에이터에 의해 구동되며 모바일 마이크로 로봇은 그 평판 위에서 움직이게 된다.¹ 되먹임 제어를 위한 센서가 없기 때문에 이송기구에 통합할 수 있는 컴팩트한 크기의 센서가 필요하다. 또한, 이송기구에 리니어 가이드 같은 안내 시스템이 없기 때문에 요구되는 센서는 X, Y 위치 정보뿐 아니라 각도 제어를 위한 정보도 줄 수 있어야 한다.

현재 사용 가능한 센서로는 Numerik Jena 센서가 있다. 이 센서는 2 축의 위치 정보와 회전 운동을 계측 할 수 있는 증분형 엔코더이다. 측정 원리는 3 분할 회절격자 시스템에 의한 모아레 무늬의 변화에 기반하고 있다.² 비록 Jena 센서가 좋은 분해능(50nm)과 정확도($\pm 5\mu\text{m}$)를 가지고 있지만 측정범위가 개발하고자 하는 플랫폼에 적합하지 않을 뿐만 아니라 센서 자체의 크기가 상대적으로 너무 크다. 다른 방식의 센서로는 3 자유도 평면 운동 측정이 가능한 듀얼 센싱 시스템이 있다.³ 하지만 이 센서는 렌즈와 같은 광학기기를 필요로 하기 때문에 전체 센싱 시스템의 크기가 커지게 된다. 또 다른 방식으로 2 축의 홀 현상 기반의 센서를 이용한 다자유도 측정시스템이 있다.⁴ 이 시스템은 비교적 저가로 절대위치 정보측정에 사용될 수 있지만 분해능이 떨어지고 자기장이 필요하며 시스템 크기가 크다는 단점이 존재한다. 또한, 비전을 이용한 위치측정기법이 제안된 바 있다.⁵ 일정한 원형의 구멍 패턴을 가진 평판을 이용하며 위상변화에 따른 간섭현상을 계측하여 위치정보를 구한다. 하지만, 위상 정보를 얻기 위해 모든 패턴이 필요하며 간섭 현미경과 기타 광학장치들이 요구됨에 따라 시스템 크기가 커지게 된다.

이전 연구를 통해서 비전과 특정한 패턴을 이용한 위치측정 방식이 컴팩트한 저가의 시스템 개발에 사용될 수 있음을 알 수 있었다.⁶ 하지만, 샌드위치구조 타겟 제작 시 오차가 발생하며 LED와 확산판(diffuser) 사용으로 시스템 크기가 크고 패턴에 사용되는 블랍의 개수가 많은 점 등의 단점

이 있다. 이에 본 연구에서는 보다 컴팩트한 측정 시스템을 위해 기존에 사용한 LED 광원대신에 500nm 파장을 가진 얇은 전계 형광 박막(electroluminescence foil)을 사용하여 12mm 두께의 측정시스템을 0.8mm 두께로 크기를 줄였다. 또한, 새로운 블랍 패턴과 절대 위치 엔코딩 및 디코딩 알고리즘을 제안하여 단위 유닛 당 블랍 개수를 6 개에서 2 개로 줄였으며 샌드위치 구조 대신 하나의 평판으로 타겟을 만들고 제조과정 시 발생한 오차를 소프트웨어적으로 후보정하는 기법을 제시하였다. 먼저 타겟 제작을 위해 통계적실험계획법 기반의 최적화 설계기법을 적용하였다. 이는 해석적 기법을 적용할 경우, 실제 미세구멍 형상 계측이 어렵고 광원의 불균일성에 기인한 영향으로 신뢰할 만한 해석결과를 얻을 수 없기 때문이다. 또한 많은 구멍가공이 수반되므로 통계적기법이 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 마지막으로 레이저간섭계를 이용하여 개발된 측정시스템의 성능을 평가하였다. 개발된 절대위치 측정센서는 PZT 기반의 XY 구동 스테이지의 되먹임제어를 위해 사용되었으며 모바일 마이크로 로봇과 함께 마이크로 핸들링을 위한 플랫폼 개발에 적용되었다.

2. 측정시스템 구성

측정시스템은 Fig. 1 과 같이 특정한 구멍 패턴을 가지고 있는 움직이는 평판(타겟)과 전계 형광 박막, CMOS 타입의 이미지센서로 구성된다. 청록색을 가진 광원이 타겟의 한 면에 부착되고 이미지센서는 반대편에 일정한 거리를 두고 고정된다. 500nm 파장의 광이 박막에서부터 나와 타겟의 구멍을 통과하여 최종적으로 이미지 센서에 상을 맺게 된다. 선명한 상을 얻기 위해 타겟은 이미지센서 표면에서 가능한 가깝게 위치시킨다.

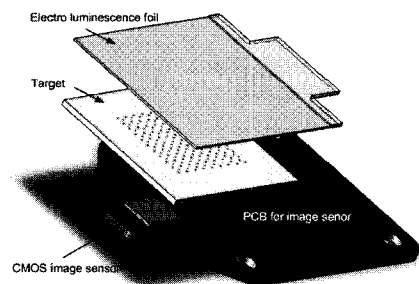


Fig. 1 The sensor structure

구멍 패턴은 22mm×22mm×0.8mm (H×V×T) 스테인리스 스틸 평판에 2μm 반복정밀도를 가진 레이저 가공을 통해 제작되었다. 이미지센서는 SXGA (1280×1024) 해상도를 가지며 픽셀 크기는 3.18μm×3.18μm, 이미지 영역은 4.13mm×3.28mm 이다.

3. 타겟 최적 설계를 위한 실험계획법

3.1 설계인자

측정시스템을 구성하는 타겟을 설계하는데 필요한 중요한 설계인자로써 구멍의 크기, 타겟의 두께, 이미지 프로세싱을 위한 경계값(threshold)이 있다. 먼저 타겟의 두께(구멍의 길이)는 광전송효율 관점에서 고려해 볼 수 있다. 만약 구멍이 이상적으로 광도파관과 같이 작용한다면 광전송효율은 높아질 것이다. 일반적으로 광도파관은 전반사 현상을 이용하며 코어의 굴절율이 클래딩 보다 크다. 하지만, 구멍의 경우, 코어는 구멍 내부의 공기이며 클래딩은 스테인리스 스틸이 된다. 즉, 전반사가 일어날 수 없는 상황이 되며 광전송효율이 매우 작게 된다. 축방향과 수평인 입사광의 경우 광전송 손실을 최소화 할 수 있지만 축과 수평하지 않는 대부분의 입사광은 타겟 내부로 흡수되거나 구멍내부 면에서 반사되어 진행할 것이다. 이 경우 구멍의 길이가 길수록 구멍을 통과하는 빛의 양이 줄어들음을 알 수 있다.

또한, 미세한 구멍을 통해 진행하는 빛이 형성하는 이미지의 선명도를 이해하기 위해 핀홀 카메라 원리를 적용해 볼 수 있다. 일반적으로 작은 크기의 구멍이 더 선명한 이미지를 형성한다. 하지만 너무 작은 구멍의 경우 회절현상으로 인해 선명도가 떨어지게 된다. 만약 빛의 파장이 조리개에 비해 비교적 크다면 광파가 방해물 넘어 영역으로 큰 각을 가지고 퍼지게 된다.⁷ 본 연구에 사용된 구멍의 지름은 입사광의 파장에 비해 충분히 크므로 이러한 회절현상은 없는 것으로 가정할 수 있다. 이는 이전 수행한 예비실험에서 얻은 이미지들에 회절 무늬가 없는 것을 통해서도 알 수 있다. 결국, 타겟을 설계하는데 있어 이러한 상충관계가 있다. 작은 크기의 구멍이 더 선명한 이미지를 주지만 통과하는 빛의 양이 줄어들어 얻어지는 이미지가 어두워진다. 구멍의 길이를 짧게 하면 더 많은 양의 빛이 통과 할 수 있지만 상대적으로 반사각들이 큰 빛들이 이미지센서에 도달하

게 된다. 해석적으로 최적설계를 수행하는 대신 통계기반의 실험계획법인 반응표면분석기법을 적용하기로 한다. 주요 인자는 구멍의 크기, 타겟의 두께, 이미지처리 위한 경계값으로 하였다. 각 인자는 -1, 0, 1 의 3 가지 수준으로 나누었으며 3 수준 설계기법 중 하나인 Box-Behnken 기법을 사용하였다.⁸

Fig. 2 는 설계법을 도식화한 것으로 x_1, x_2, x_3 은 3 개의 인자를 -1, 0, 1 은 3 개의 수준을 나타낸다. 빨간 점의 조건으로 1 회의 실험이 수행되며 검은 점의 조건으로 3 회가 수행된다. 따라서, 실험 반복을 2 번 할 경우, 총 실험횟수는 30 회가 된다.

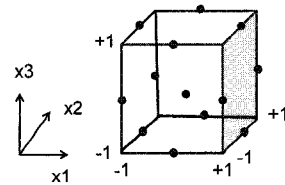


Fig. 2 The Box-Behnken design⁸

Table 1 The experiment design for developing the proposed sensor system

Factors	Level		
	-1	0	1
A(Hole Size)	100μm	150μm	200μm
B(Thickness)	600μm	800μm	1000μm
C(Threshold)	25%	50%	75%

3.2 Box-Behnken 설계기법

통계적 실험계획법을 적용하기 위해 Table 1 에서와 같이 3 개의 인자와 3 개의 수준을 결정하였다. 구멍의 크기는 지름을 말하며 이미지 처리를 위한 경계값 수준은 구멍을 통과한 빛의 최대 광세기(intensity) 값의 25%, 50%, 75%로 하였다. 두께가 다른 3 개의 테스트 타겟을 제작하였으며 각 타겟은 지름이 각각 100, 150, 200μm 인 3 개의 구멍을 가지고 있다. 총 30 회의 실험을 랜덤한 순서로 수행하였다. 타겟은 고정되어있으며 이미지 처리를 거쳐 획득된 블랍(blob) 이미지의 중심좌표의 변동을 목적함수로 하였다. 매 실험마다 블랍의 중심좌표를 1000 번 획득하였으며 큰 변동은 향후 센서 시스템의 성능이 좋지 않음을 보여 준다. Table 2 는 중심좌표의 변동에 대한 분산분석을 보여준다. 적합결여(lack-of-fit)정도를 확인해보면 P

값이 0.05 보다 크므로 반응표면을 추정하는 접합 곡선(curve fitting)으로 2 차 방정식 모델이 적합하다는 걸 알 수 있다. 또한 회귀모델의 2 차항이나 교호작용에 대한 P 값을 보면 선형회귀모델도 적용 가능함을 알 수 있다. 분산분석 기반으로 구한 회귀모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 0.529746 - 0.165568x_1 + 0.010811x_2 \\ & + 0.197549x_3 + 0.040781x_1^2 + 0.077382x_2^2 \quad (1) \\ & + 0.038337x_3^2 - 0.017773x_1x_2 - 0.061965x_1x_2 \\ & + 0.009628x_2x_3 \end{aligned}$$

여기서 x_1 , x_2 , x_3 는 각각 구멍의 지름, 타겟 두께, 이미지처리 경계값을 나타낸다. 위 수식에서 구멍의 크기와 이미지처리 경계값이 타겟 두께에 비해 더 유의한 것을 알 수 있다. Fig. 3은 잔차정규누적 확률분포(Normal probability plot of residuals)로 추정된 모델의 적합성을 보여준다.

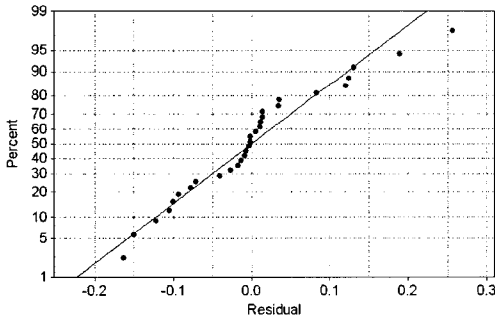


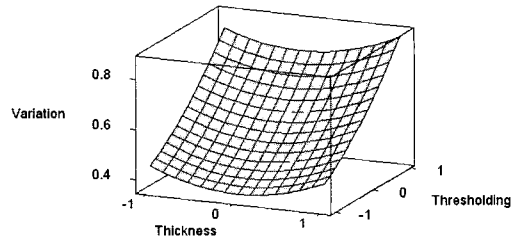
Fig. 3 Normal probability plot of residuals

추정모델의 이상치(outliers)를 평가하기 위해 표준화잔차(standardized residuals)를 구하였다.

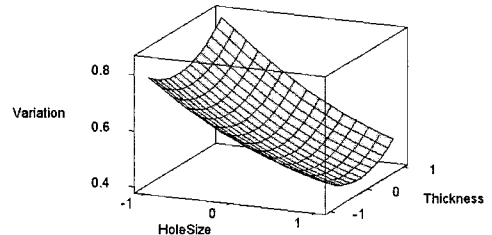
$$d = \frac{e}{\sqrt{MSE}} = \frac{0.255363}{\sqrt{0.01334}} = 2.21 \quad (2)$$

Table 2 The analysis of variance

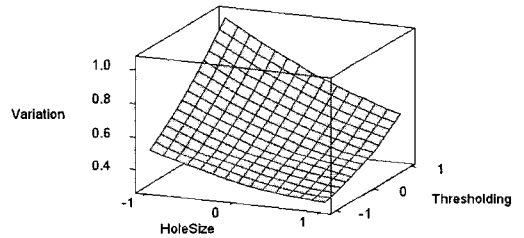
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P value
Regression	9	1.15877	1.15877	0.12875	9.65	0
Linear	3	1.06488	1.06488	0.35496	26.61	0
Square	3	0.0599	0.0599	0.01997	1.5	0.246
Interaction	3	0.03399	0.03399	0.01133	0.85	0.483
Residual error	20	0.26682	0.26682	0.01334		
Lack-of-Fit	3	0.05649	0.05649	0.01883	1.52	0.245
Pure error	17	0.21034	0.21034	0.01237		
Total	29	1.4256				



(a) Thickness and thresholding when hole size is 0



(b) Hole size and thickness when thresholding is 0



(c) Hole size and thresholding when thickness is 0

Fig. 4 Surface plot of the variation

가장 큰 표준화잔차는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

여기서 e 는 잔차를 MSE 는 평균제곱오차를 나타낸다. 가장 큰 표준화잔차가 3 보다 작기 때문에 잠재적 이상치가 없다고 볼 수 있다.

실험인자에 따른 변동을 나타내면 Fig. 4(a), (b), (c) 와 같다. Fig. 4 에서 보면 타겟 두께가 변동에 주는 영향이 다른 두 인자에 비해 작음을 알 수 있다. 반응표면 분석을 기반으로 변동을 최소화 하는 조건은 200 μm 의 구멍 지름, 800 μm 의 타겟 두께, 최대 광세기의 25%의 이미지 처리 경계값이 되고 최소 변동값은 0.3077 μm 이다. 하지만, 불량들 사이 거리에 비해 구멍의 크기가 너무 크면 간섭이 발생하므로 구멍의 크기는 150 μm 로 선정하였다.

4. 절대위치계산

4.1 타겟의 구멍 패턴

절대위치 코딩을 위한 타겟은 Fig. 5 와 같이 크기가 다른 두 종류의 불량으로 구성된다. 사각형 모양의 한 유닛셀(unit cell)은 4 개의 그리드 불량과 한 개의 절대위치평가를 위한 표시(marker)를 가지고 있다.

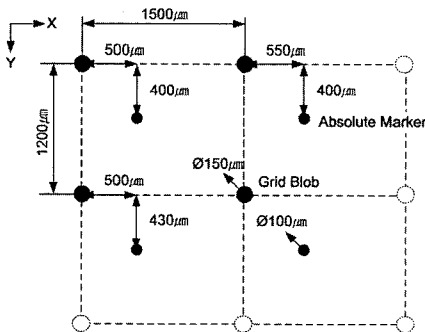


Fig. 5 Hole array on the target for absolute position

불량의 크기를 기반으로 그리드와 절대위치표시를 구분하게 된다. 타겟의 각도 변화를 측정하기 위해 X 축 방향의 그리드 불량 사이의 거리와 Y 축 방향의 그리드 불량 사이의 거리를 다르게 하였다.

한 유닛셀의 왼쪽 위 불량은 지역좌표계(local coordinate system)의 원점으로 사용된다. 원점의 변위는 상대위치 정보를 주며 지역좌표계에 대한 절대위치표시의 좌표는 유닛셀의 위치에 따라 X, Y 축 방향으로 바뀐다. 절대위치 코딩은 이들 좌표

정보를 기반으로 수행된다. 예를 들어, Fig. 5 에서 선택된 유닛셀의 절대위치표시가 50 μm 증가하면 X 방향의 오프셋(offset)이 1 증가하게 된다.

4.2 이미지처리

이미지 처리 라이브러리로 TLIB(EPFL Tracking LIBrary)를 사용되었다.⁹ 예비실험을 통해 RGB 픽셀정보를 다 사용하는 것보다 G(녹색) 픽셀정보만 사용할 경우 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 불량 모서리 부분에 나타나는 R(빨강) 영역은 불량의 중심(centroid of blob)을 계산하는데 영향을 미치기 때문이다. 또한, 획득된 이미지 모서리 부분에 완전하지 않는 불량은 제거된다.

이미지 이진화(binazation)를 위한 경계값은 최대광세기의 25%의 값으로 하였다. 확장된 이산화 기법(Extended hard threshold)을 불량의 중심을 계산하기 위해 사용되었다. 일반적인 이산화 기법에서는 경계값보다 큰 모든 픽셀 값이 1로 바꾸게 되지만 확장된 이산화 기법은 Fig. 6 에서와 같이 불량 중심에 가까운 픽셀이 불량 모서리의 픽셀에 비해 더 큰 값을 가질 수 있게 해준다.⁶ 이전 연구에서 불량 검출기법(blob detection method)이 제안된 바 있다.⁶ 불량이 원형상을 가지고 있으므로 원을 둘러 싸는 사각형을 그릴 수 있다.

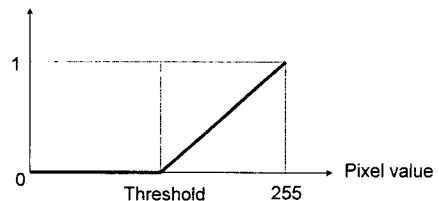


Fig. 6 Extended hard threshold⁶

일단 이 사각형 영역이 찾아 지면 그 속에 포함되어 있는 불량의 중심을 그 영역을 적분함으로써 구할 수 있다. 제안된 불량 검출기법은 기존에 TLIB 에 포함 되어 있는 검출기법보다 처리속도가 빠르며 센서의 응답속도를 높일 수 있다.

4.3 절대위치 디코딩 기법

먼저 제안하는 패턴의 가능성을 검증하기 위해 실제 이미지센서를 통해 획득되는 이미지크기 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 패턴 기반의 디코딩 알고리즘이 성공적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Step 1: 디코딩 위한 준비

이미지 센서를 통해 이미지를 획득한 후, 검출된 블랍의 중심좌표를 구한다. 블랍의 크기를 기반으로 블랍을 두 분류로 나눈 후 이미지 중심에서부터 거리에 따라 블랍의 순서를 매기게 된다. 즉, Fig. 7 에서 보는 바와 같이 이미지 중심에 가장 가까운 블랍으로부터 가장 먼 블랍 순으로 순서를 매긴다.

Step 2: 각도 계산

이미지 중심에서 가장 가까운 블랍에서 시작하여 블랍 중심 좌표를 이용하여 그리드 블랍 사이의 거리를 계산한다. X, Y 축 방향의 그리드 블랍 사이 거리는 주어진 것으로 앞서 계산한 거리와 비교해서 X 축 방향의 블랍과 Y 축 방향의 블랍을 찾을 수 있다. 이를 기반으로 타겟이 가지고 있는 각도를 계산할 수 있다. 동일한 방식을 모든 블랍에 대해 계속 적용하여 각 경우의 각도값을 평균할 수 있다. Fig. 7 의 경우, 7 개의 경우를 찾을 수 있으므로 7 개의 각도값을 계산 할 수 있다. 최종 각도는 다음과 같이 구해 진다.

$$\theta = \sum_i^n \tan^{-1} \left(\frac{\text{distance in Y direction}}{\text{distance in X direction}} \right) / n \quad (3)$$

Step 3: 유닛셀 선택

이미지 중심에 가장 가까운 그리드 블랍에서부터 유닛셀을 찾아 간다. Fig. 7 의 경우, 첫번째 유닛셀은 블랍 0, 1, 2, 3 으로 이루어진다. 블랍 0 에서 시작해서 이전 단계에서 구한 각도와 주어진 X 축, Y 축 그리드 증가치를 이용하여 블랍 1, 2, 3 을 찾을 수 있다.

Step 4: 절대위치표시

각 유닛셀의 왼쪽 위 그리드 블랍(left-upper grid blob)를 그 유닛셀의 지역좌표계의 원점으로 사용한다. 이 지역좌표계 기반으로 절대위치표시(absolute marker)의 좌표(dx, dy in Fig. 7)를 구한다. 한 개 유닛셀은 한 개의 절대위치표시를 가지고 있다. 이 절대위치표시는 타겟 상에서의 유닛셀 위치를 알 수 있는 정보를 제공한다.

Step 5: 절대위치계산

절대위치표시 좌표를 기반으로 절대위치를 계산할 수 있다. 이미지 중심에서 유닛셀의 지역좌표계 원점까지의 거리와 그 유닛셀이 가지는 절대위치표시 정보, 이미지 중심축을 기준으로 회전운

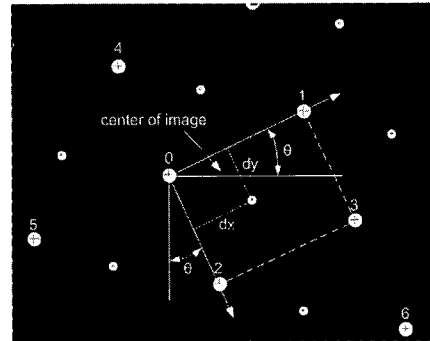


Fig. 7 The simulated image with the same size of image from a real camera

동을 고려해 실제 타겟의 위치가 된다. 획득된 이미지에 유닛셀이 여러 개가 존재할 수 있으므로 최종 절대위치는 각 유닛셀에서 구해진 값을 평균해서 구하게 된다.

4.4 실험셋업 및 보정

PZT 기반의 액츄에이터에 의해 구동되는 XY 스테이지를 개발된 측정시스템을 평가하는데 사용되었다. 광원으로 사용되는 전계 형광 박막을 붙인 타겟을 작은 거울이 부착된 정육면체에 고정하고 스테이지를 이용해 원하는 위치로 이동시킨다. 정육면체에 고정된 거울은 레이저 간섭계의 반사경으로 사용된다. Z 축에 고정되어 있는 카메라 모듈과 타겟사이의 거리는 Z 축 수동스테이지를 조절해 가능한 작게 한다. 레이저 간섭계 위치측정 시스템을 통해 실제 이동거리를 측정한다.

그리드 블랍 간격은 X 축 방향으로 1500μm, Y 축 방향으로 1200μm 으로 제작되었지만 실제 그리드 블랍 사이의 간격은 주어진 이상치와 같지 않다. 이미지 센서와 타겟 사이의 간격과 획득된 이미지내 위치에 따라서 그리드 블랍 사이 간격이 변한다. 실험을 통해 이미지 센서와 타겟 사이 간격이 클수록 그리드 간격이 커지고 이미지의 오른쪽으로 갈수록 작았으며 Y 축 방향의 그리드 간격의 변동이 X 축 방향보다 작았다. 이는 광원의 특성과 셋업 오차에 기인한 것으로 사료된다. 이미지 센서의 보호 유리(protection glass)가 평편하지 않거나 타겟 면과 이미지 센서의 면이 평행하지 않는 것이 원인이 될 수 있다.

이 문제를 풀기 위해 먼저 측정시스템 셋업을 마친 후 전체 타겟 영역을 스캔하며 실제 그리드 간격을 계산한다. 이상적인 그리드 간격 값 대신

에 측정된 데이터를 이용하여 절대위치를 계산한다. 두번째로 해야 할 일은 레이저 간섭계를 이용하여 측정된 데이터를 보정하는 것이다. 측정된 그리드 간격 값들이 실제 그리드 값과 다르기 때문에 전체 이동거리에 대한 실제 이동거리와 개발 센서에서 측정된 값을 비교하여 보정하였다.

5. 성능 평가

5.1 분해능, 반복정도, 정확도

센서의 분해능은 이송이 없는 상태에서 센서에서 측정되는 값의 변동을 조사함으로써 평가될 수 있다. σ 를 변동의 표준편차라고 한다면 분해능은 6σ 로 정의될 수 있다. Fig. 8 은 4 분 정도 X 축 방향의 센서 측정치의 변동을 보여준다. 실험을 통해 병진운동에 대한 분해능은 $0.194\mu\text{m}$ 에서 $0.257\mu\text{m}$, 회전운동에 대해 $110\mu\text{radian}$ 임을 알 수 있다. 센서의 반복정도는 같은 위치로 반복적으로 이동할 때 실제 변위의 변동으로 기술될 수 있다. 임의의 위치에서 타겟을 다양한 간격으로 이동시킨 후 되돌아 온다. 20 번 반복하면서 센서 데이터를 분석한다. 실제 변위의 표준편차의 6 배를 반복정도로 정의하고 계산해 보면 $0.236\mu\text{m}$ 였다. 개발 센서의 병진운동에 대한 정확도(accuracy)는 레이저 간섭계를 통해 평가되었다. Y 축 방향으로 3 번의 측정을 수행하였다. 전체 Y 축 이송거리를 3 등분해서 전체 X 축 이송에 대한 정확도를 측정하였다. 타겟은 $100\mu\text{m}$ 씩 증가하면서 6mm 까지 이송된다. 정확도 측정결과를 나타내면 Fig. 9 와 같다. Fig. 9 에서 선택되는 유닛셀이 변할 때마다 센서의 출력과 레이저 간섭계 값의 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 레이저 가공으로 제작된 구멍의 부정확도에 기인한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10 은 개발된 측정시스템 성능평가를 위한 실험장치 사진과 캡처된 이미지이다. 박막 형태의 광원이 PZT 기반의 초정밀스테이지 위에 고정되어 이송되며 이미지센서는 수동스테이지 Z 축에 설치된다. Table 3 은 실험을 통해 평가한 센서의 특성을 Table 4 는 각 이미지처리 과정에 대한 처리시간을 나타낸다. 가장 많은 시간이 걸리는 블랍 검출과정은 획득한 이미지를 그레이이미지(grey image)로 변환하고 경계값을 이용한 이산화과정, 블랍 중심좌표 계산으로 이루어진다. 총 프로세스에 걸리는 시간은 4.2Hz 로 개발된 센서의 측정 속도가 된다.

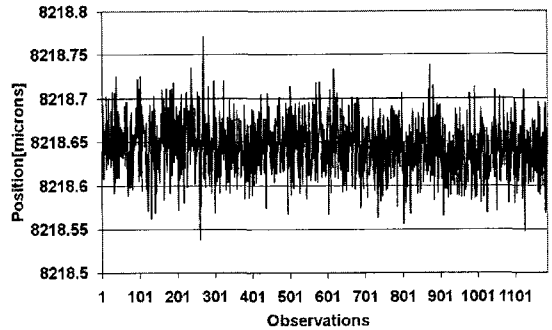


Fig. 8 The variation of sensor data in X direction when the target is stationary

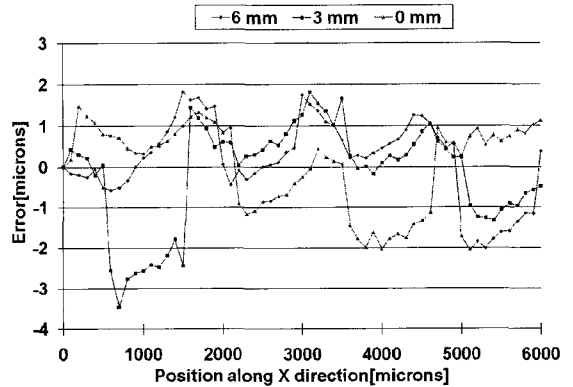


Fig. 9 The difference between sensor reading and a laser interferometer with step size of $100\mu\text{m}$

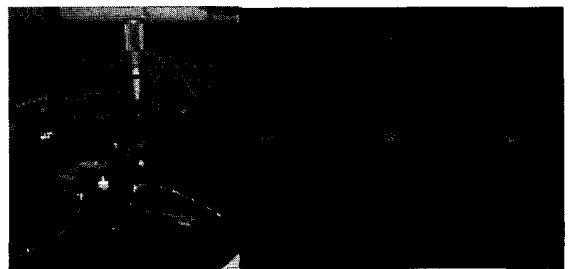


Fig. 10 Photos of experimental setup and an acquired screen image

Table 3 The specification of the sensor

Resolution	$0.257\mu\text{m}$
Repeatability	$0.236\mu\text{m}$
Accuracy	$\pm 3.5\mu\text{m}$

Table 4 Computing time

	Time[ms]
Image acquisition	60.248
Blob detection	130.727
Absolute position calculation	48.609
Total process	239.584 (4.2Hz)

5.2 마이크로 로봇 플랫폼 개발

마이크로 부품 조립 및 핸들링을 위한 플랫폼은 Fig. 11 과 같이 개발된 비전 기반의 절대위치센싱 시스템이 통합된 이송평판, 모바일 마이크로 로봇, 광학현미경으로 이루어 진다. 모바일 마이크로 로봇은 플랫폼의 유연성과 재구성화를 높여준다.¹⁰ 이송평판은 Fig. 12 와 같이 제작되었으며 Fig. 13 과 같이 피에조 액츄에이터와 이미지 센서 위에 올려진다. 제어 시스템은 Fig. 14 와 같이 한 대의 컴퓨터는 로컬 뷰 측면에서 개발한 센서의 이미지처리 구현을 위해 사용되며 이미지 획득, 블랍 처리, 절대위치 계산을 위한 디코딩 과정을 수행하게된다. 다른 한 대의 컴퓨터는 광학현미경의 상단에 장착된 글로벌 뷰용 광학장치를 통한 모바일 로봇의 위치추적을 담당하고 로컬 뷰의 위치 정보를 토대로 되먹임제어를 수행한다. 두 컴퓨터 시스템 사이의 데이터 통신은 RS-232 시리얼 포트를 통해 구현하였으며 획득된 패턴 이미지를 기반으로 구한 절대위치 값과 각도 정보를 되먹임 제어를 위해 매 루틴 마다 보내게 된다. 리니어가이

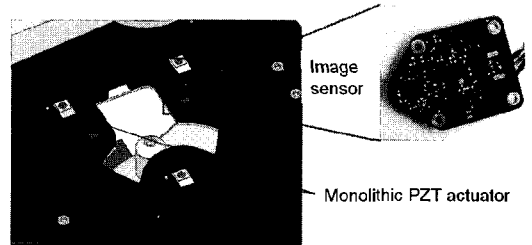


Fig. 13 Monolithic PZT actuator and CCD image sensor

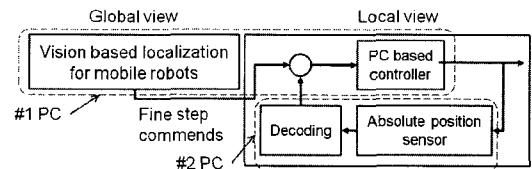


Fig. 14 Control scheme

드 같은 가이드링 시스템이 없기 때문에 이송평판은 각도 정보를 이용하여 일정한 각도를 유지하도록 제어된다.

6. 결론

제안한 센싱 시스템은 비용 면에서 효율적이며 아주 컴팩트하다. 실험계획법을 통해 복잡한 해석적 방법 대신 적절한 설계인자 값을 결정할 수 있었다. 통계적 실험계획법을 수행하여 구멍의 지름과 이미지처리 경계값이 주요인자임을 알 수 있었다. 제안한 구멍 패턴에 의해 절대 위치를 계산할 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었으며 서브미크론 수준의 분해능과 반복정도를 얻을 수 있었다. 간단한 보정 이후, 센서의 정확도는 약 $\pm 3\mu\text{m}$ 였다. 최종적으로 개발된 센싱 시스템은 마이크로 핸들링 및 조립을 위한 마이크로 로봇 플랫폼에 통합되었으며 되먹임 제어를 수행하였다. 향후, 더 정밀한 구멍 가공을 통해 정도를 향상하고 이미지 처리를 최적화하거나 새로운 알고리즘을 이용하여 처리속도를 높일 수 있을 것이다. 또한, 정도 향상을 위해 오차보정기법도 적용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2007 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-357-D00020).

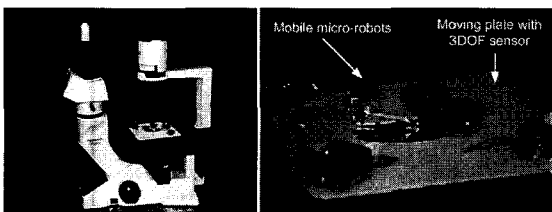


Fig. 11 Photos of the integrated micro-robotic platform with the proposed sensor

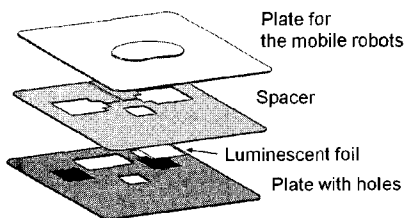


Fig. 12 Moving plate with micro holes

참고문헌

1. Bergander, A., Driesen, W., Varidel, T. and Breguet, J. M., "Monolithic piezoelectric actuators for miniature robotic systems," 9th International Conference on New Actuators, pp. 114-117, 2004.
2. Mobius, J., "Performance Encoders for High Performance Linear Drive Applications," Drives and Controls/Power Electronics Conference, Session 6, Paper 1, pp. 1-5, 2001.
3. Lee, K. and Zhou, D., "A Real-Time Optical Sensor for Simultaneous Measurement of Three-DOF Motions," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 9, No. 3, pp. 499-507, 2004
4. Kawato, Y. and Kim, W. J., "Multi-Degree-Of-Freedom precision position sensing and motion control using two-axis hall-effect sensors," Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128, No. 4, pp. 980-988, 2006.
5. Sandoz, P., "Nanometric position and displacement measurement of the six degrees of freedom by means of a patterned surface element," Applied Optics, Vol. 44, No. 8, pp. 1449-1453, 2005.
6. Urbanek, L., Cimprich, T., Dave, N., Abdelkefi F. and Breguet, J. M., "Compact 3-degrees of freedom absolute position sensor based on a CCD chip," Proceedings of the SPIE, Vol. 6716, pp. 67160G1-12, 2007.
7. Genet, C. and Ebbesen, T. W., "Light in Tiny Holes," Nature, Vol. 445, No. 7123, pp. 39-46, 2007.
8. Box, G. E. P. and Behnken, D. W., "Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables," Technometrics, Vol. 2, No. 4, pp. 455-475, 1960.
9. Grange, S., Fong, T. and Baur, C., "TLIB: A real-time computer vision library for HCI applications," Digital Image Computing - Techniques and Applications Conference, pp. 1017-1026, 2003.
10. Driesen, W., Varidel, T., Mazerolle, S., Bergander, A. and Breguet, J. M., "Flexible micro manipulation platform based on tethered cm3-sized mobile micro robots," Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 145-150, 2005.