

# 로봇의 위치 정밀도 측정을 위한 LTS의 설계 및 제작

## Design and Manufacture of Laser Tracking System for Measuring Position Accuracy of Robots

황 성 호, 이 호 길, 최 경 락, 김 진 영

(Sung-Ho Hwang, Ho-Gil Lee, Gyeong-Rak Choi, and Jin-Young Kim)

**Abstract** : The main problem of the calibration of robots is to measure the position and orientation of a robot end effector. The calibration methods can be used as a tool to improve the accuracy of robots without change of the arm or control architecture of robots. But such calibration methods require accurate measurements. Dynamic measurement of position and orientation provides a solution for this problem and improves dynamic accuracy by dynamic calibration of robots. This paper describes the development of the laser tracking system capable of determining the static and dynamic performance of industrial robots. The structure and system components are presented and basic experimental results are included to demonstrate the instrument performance. The system can be applied to the remote controlled mobile robots as well as the calibration of robots.

**Keywords** : laser tracking system, robot calibration, position accuracy, robot performance

### I. 서론

오늘날, FMS(Flexible Manufacturing Systems)의 필수 요소인 로봇은 기계공구의 장탈착, 조립 및 용접, 레이저 절단, 측정 등의 다양한 handling 작업에 이용되고 있다. 이러한 다양한 로봇의 응용에 있어서 위치 설정 및 공간상에서의 위치추종 등은 공통적인 작업이 되며, 따라서 많은 적든 로봇의 위치 정밀도에 대한 요구는 이러한 작업에 항상 내재되어 있다. on-line 프로그램되는 용접 로봇은 단지 우수한 위치 반복 정밀도만을 필요로 하는 반면에, 정밀조립용 로봇에 있어서는 로봇의 위치정밀도가 중요한 요구조건이 되며, 레이저 절단이나 deburring 작업 등은 로봇의 우수한 궤적 추종 성능을 필요로 하게 된다. 또한, off-line 프로그램의 성공적인 적용을 위해서는 로봇의 절대위치 정보뿐만 아니라, 로봇 주변 장치(조립 팔레트, 용접 테이블)의 위치 정밀도 정보까지도 필요하게 된다[1]. 이상의 다양한 작업을 성공적으로 구현하기 위해서는 로봇에 대한 정밀도 확보가 중요하며, 이것은 우수한 시험과 평가를 통한 로봇 calibration이 필수적인 작업이 된다. 그러나 로봇은 다자유도를 갖는 복잡한 구조 특성 때문에 기존의 공작기계 시험방법의 직접적인 이용은 적합하지 않다. 따라서 최근에 다양한 방법과 장비가 로봇의 성능을 시험하고 평가하기 위하여 개발되었고, 또한 국제표준으로 제정되기에 이르렀다.

지금까지 로봇의 성능 평가 시스템에 관련된 연구는 주로 미국과 유럽의 선진국에서 주도되었다. 1990년 ISO에서는 로봇 성능에 관련된 표준을 정하고, 1995년에는 로봇의 성능평가 방법에 대한 규격을 제정하였다[2]. 로봇의 성능 평가 방법으로는 높은 정밀도로 짧은 거리의 정밀도를

측정하는 positioning test probe method, 가속도계와 자이로를 이용한 inertial measuring method, 초음파 신호를 이용한 ultrasonic trilateration 방법 등이 있다[3]. 국내에서는 최근 들어 삼성, 대우, LG 등에서 고가의 성능 평가 장비를 외국으로부터 들여와 자사의 로봇 평가에 시도하고 있으나, 이러한 장비들은 3억원 이상되는 고가의 장비일 뿐만 아니라, 적용 시스템에 맞게 설치, 운용하는데 많은 know-how가 필요하여 자동화, 로봇관련 생산설비를 개발하는 중소기업에서는 장비를 갖추기가 사실상 어려운 실정이다[4].

본 논문에서는 ISO 13309에서 표준으로 제시한 여러 방법 중 적용 범위 및 측정 정밀도가 우수하고 정적, 동적 정밀도 측정이 모두 가능한 single laser tracking interferometry 방법의 필수장비인 LTS(Laser Tracking System)를 개발하였다. 본 시스템은 위치 추종을 위하여 PSD(Position Sensing Detector) 센서를 이용하였으며, 위치 측정 정밀도 및 추종 성능을 높이기 위하여 DD 모터(Direct Drive Motor)를 사용하였다. LTS의 동작 원리와 시스템 구성 및 사용된 부품에 관하여 기술하였으며, 개발된 LTS의 성능을 평가할 수 있는 기초적인 실험을 수행하였다. 이 시스템은 로봇 calibration에의 응용뿐만 아니라 원격 유도 장치 및 이동로봇에도 충분히 응용될 수 있을 것이다.

### II. LTS의 측정원리 및 설계제작

#### 1. LTS의 측정 원리

본 논문에서 개발한 LTS는 스위스 Leica사의 laser tracker[5]의 측정원리를 기반으로 하고 있으며, 그림 1은 레이저 간섭계(laser interferometer), DD 모터, PSD 센서, 각종 광학소자, 그리고 컴퓨터 측정 시스템으로 구성된 LTS의 기능적 layout을 보여준다.

LTS는 레이저 간섭계로부터 측정된 목표물까지의 거리와

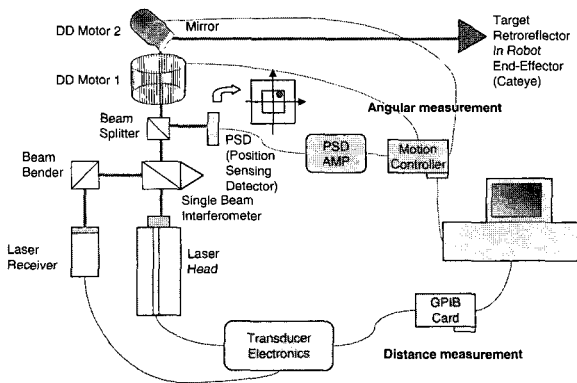


그림 1. LTS의 전체 시스템에 대한 기능적 layout.  
Fig. 1. Functional layout of the overall LTS system.

목표물 추종 메커니즘(tracking mirror assembly)으로부터 얻어진 실시간 각도 데이터를 이용하여 3차원 위치를 측정하는 시스템이다. 이때 목표물 추종은 입사빔과 평행하게 반사빔(return beam)을 발생시키는 cateye를 목표물에 부착하고 이것의 중심에 투사된 빔의 추종오차를 측정, 이 오차를 최소화하고자 하는 방향으로 미러(tracking mirror) 각도를 조절함으로써 이루어진다.

레이저 간섭계 거리 측정 시스템은 레이저 발생기(laser head)와 간섭계(single beam interferometer)로 구성되어 주파수 변환(heterodyne) 원리를 이용한다. 레이저 헤드로부터 발생된 빔은 기준빔(reference beam)과 측정빔(measurement beam)으로 분리시키는 간섭계를 통과하여 지나간다. 여기서, 측정빔은 70-30 빔 스플리터(beam splitter)를 통과하게 되는데, 이 가운데 70% 빔은 2축으로 구성된 추종 메커니즘에 의해서 반사체 목표물에 부딪힌 후 180°반사되어 투과빔(incident beam)에 평행하게 되 돌아간다. 만약 반사체가 이동하여 빔이 반사체의 중심에 부딪히지 않는다면, 투과빔과 반사빔 사이에 편차(offset)가 발생하게 되고, 이 양에 의해 목표물 추종이 이루어지게 된다. 즉, 반사된 빔은 추종 메커니즘을 거친 후 70-30 빔 스플리터로 다시 되돌아가게 되는데, 이 중 30%의 빔이 PSD 센서로 진행하여 발생된 편차량을 측정하게 된다. 또한, LTS의 주경로에 있는 반사빔의 나머지 70%는 간섭계로 다시 들어가서 기준빔과 결합된다. 이때, 반사빔의 주파수는 Doppler Shift되는데, 이것이 리시버(receiver)에 의해 감지되고 신호처리 회로(processing electronics)를 거쳐 빔이 레이저 헤드로부터 반사체까지 왕복한 거리를 측정하게 된다.

추종 미러 축들의 각도는 추종 메커니즘에 있는 2개의 DD모터에 부착된 각각의 엔코더에 의해 측정된다. 이 입력 값들은 간섭계로부터의 거리정보와 결합되어 로봇의 end effector의 위치를 LTS의 기구학적 모델을 통하여 계산하게 되고 이 값들로부터 로봇의 3차원 위치 좌표를 측정할 수 있게 된다.

반사체 목표물의 추종은 PSD 센서로부터 얻어진 추종 오차(tracking error) 신호  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 를 이용하여 수행하게 된다. 이 신호들은 발생된 빔이 반사체 목표물의 중심에 부

딛히도록 하는 추종 메커니즘내 2개 축의 보정 각도를 계산하는데 이용된다. 계산된 신호들은 미러 각도가 이 값에 설정될 수 있도록 모터 드라이버에 보내져 로봇의 end effector에 장착된 목표물을 연속적으로 추종할 뿐만 아니라, end effector의 위치와 방향에 대한 최신정보를 제공하도록 실시간으로 동작된다.

2. 목표물 추종 시스템

목표물 추종 시스템은 대상 물체의 위치를 감지하는 센서와 센서 출력을 받아들여 추종 알고리즘을 수행하는 제어부 및 제어부의 명령을 수행하는 동작부로 구성된다.

목표물 추종 시스템에 필요한 대상 물체의 위치를 감지하는 센서로 PSD(Position Sensing Detector)를 사용하였다. PSD 센서는 실리콘으로 된 광다이오드로 만들어지며 감지 범위 내에 비쳐지는 빛의 위치에 비례하는 아날로그 출력을 발생시키는 센서로서, 일반적으로 discrete 위치 검출 센서에 비해 출력 신호의 선형성, 분해능, 응답성 및 회로 구현의 편리함과 같은 특성을 지니고 있다.

본 논문에서 사용된 PSD는 스웨덴 SiTek의 2L4SP로 4mm×4mm의 감지부를 갖는 2방향 위치를 측정할 수 있는 센서로서 감지부 80%영역내에서 99.95%의 선형성을 가지며, 그림 2와 같은 구조로 이루어져 있다.

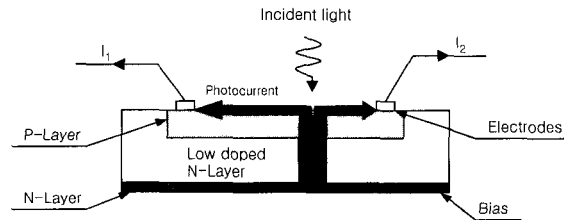


그림 2. PSD 센서의 구조.  
Fig. 2. Configuration of position sensing detector.

PSD의 입력을 받아 이로부터 대상물체를 추종하기 위한 명령값을 계산하며 구동기를 제어하는 제어부로는 DELTA TAU사의 PMAC 보드를 사용하였다. 이 보드는 MOTOROLA의 56002 DSP를 CPU로 사용하며 X, Y 2축 동시제어를 수행한다. 또한 ±10V의 PSD 출력을 받아들이기 위한 16bit A/D 모듈과 PMAC 보드와 사용자 PC와의 데이터 교환을 위한 DPRAM(Dual Ported RAM) 모듈을 함께 사용하였으며, 샘플링 시간은 5msec로 설정하였다.

본 연구에서 개발한 LTS의 1차 측정 정밀도 목표는 ±0.1mm/m이나 최근의 정밀급 로봇까지 calibration하는데 사용하기 위해서는 최종적으로 ±10μm/m의 측정 정밀도를 구현하여야 한다. 따라서, 대상물체를 추종하기 위한 구동기로 일반서보 모터가 아닌 DD 모터를 사용하였는데, 이 DD 모터는 감속기가 없어 기어 백래시(backlash)에 의한 오차 없이 높은 토크를 낼 수 있다는 특성을 갖는다. 사용된 DD 모터는 Parker사의 Dynaserv 모델 가운데 DM 시리즈로서 ±20arc·sec의 정확도(accuracy)를 갖고 있으며, 655,360pulse/rev의 해상도(resolution)를 갖는 엔코더가 함께 부착되어 있다. 이는 본 논문의 LTS가 최종 목

표로 하고 있는  $\pm 10\mu m/m$ 의 정밀도를 구현하는데 필요한 사양인 536,200pulse/rev보다 정밀한 사양이다[6].

3. 기구 메커니즘 설계 및 제작

본 논문에서 개발한 LTS의 목표사양을 만족시키기 위한 기구 메커니즘 설계 및 제작을 수행하였다. 위치 정밀도 목표사양을 충족시킬 수 있도록 각 단품의 진직도, 직각도, 평면도, 평행도, 진원도, 동심도 등의 형상 공차와 절대 치수에 대한 가공 공차, 또한 부품간 조립 공차를 충분히 고려하여 설계를 수행하였다.

LTS는 로봇의 위치를 정밀하게 측정하기 위한 측정 시스템이다. 로봇의 위치 정밀도 오차에는 로봇축의 엔코더 해상도에 의한 디지털화 오차(digitization error), 기구학적 오차(kinematic error) 등의 정적 오차와 관성과 중력에 의한 동적 오차가 존재하는데 그 발생원인은 링크와 조인트 변형에 의한 오차와 서보 시스템의 본질적인 오차에 기인하게 된다. 이러한 오차는 로봇에만 있는 것이 아니고 로봇의 위치를 정밀하게 측정하기 위한 LTS에도 당연히 존재하게 된다.

이러한 오차 요소들을 최소화하기 위한 방법이 설계의 주안점이며, 가공에서 조립을 거쳐 하나의 시스템으로 성능이 평가될 때에 그간 종합적으로 누적된 기계적인 오차(mechanical error)는 필연적으로 존재하지만 그 오차 값을 줄이면 줄일수록 시스템 성능이 양호하게 되는 것은 당연한 일이다. 특히 오차 값을 교정 혹은 보정하기 위한 S/W를 고려할 때 다음 2가지가 주된 관건이 된다. 그것은 2축이 교차하게 되는 구조에서 오는 회전축(gimbal axis)의 부정합(misalignment)과 반사경 중심부의 편심량에 해당하는 미러 중심 편차량(mirror center offset)이 고려할 요소이다[7]. 광학 부품들 간의 편차를 줄이기 위해 미러 설치부를 일체로 설계하였으며, 회전축의 부정합을 줄일 수 있도록 광학 부품 센터간의 거리를 50mm 이내로 설계, 장착하였다.

4. LTS의 위치 측정 방법

LTS의 3차원 절대위치 좌표 계산을 위해서는 초기 원점 좌표 설정을 위한 작업이 필요하다. 이를 위해 개발된 LTS에는 cateye의 초기 위치 설정을 할 수 있는 기준 위치  $P_0$ 가 잡혀있으며, 그림 3과 같이 LTS의 기구 메커니즘 구조로부터 원점 보정을 위한 초기 위치 변수인 거리

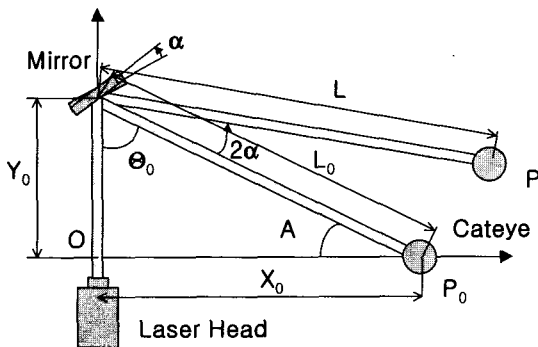


그림 3. LTS 좌표계에 대한 파라미터 정의.  
Fig. 3. Definition of parameters for LTS coordinates.

$X_0, Y_0$ 와 각도  $\theta_0, A$ 를 정의한다. 여기서, 레이저 빔이 발사되는 축과 cateye의 초기 수평축과의 교점을 원점  $O$ 로 정의하고,  $X_0$ 는 원점으로부터 cateye의 초기 위치까지의 수평거리를,  $Y_0$ 는 원점으로부터 미러까지의 수직거리를 나타낸다. 또한,  $\theta_0$ 는 수직축으로부터 미러에 의해 반사된 빔의 각,  $A$ 는 수평축으로부터 미러에 의해 반사된 빔의 각을 의미한다.

본 시스템에서  $X_0$ 는 300mm,  $Y_0$ 는 200mm, 따라서 각도  $A$ 는 33.69deg,  $\theta_0$ 는 56.31deg가 된다.

이러한 초기 상태에서 DD 모터의 엔코더 값을 0으로 초기화한 후, 반사경 cateye의 움직임이 시작되면, 2개의 모터축으로부터 엔코더값( $\alpha, \beta$ )을, 레이저 간섭계로부터 상대거리( $L'$ )를 측정하게 된다.

LTS의 위치좌표계산은 구좌표계(spherical coordinates)를 이용하며, 이에 대한 좌표 설정은 그림 4와 같이 정의한다[5]. 이때, 목표물 P에 대한 좌표계에서의 값을  $\phi = \beta, \theta = 2\alpha + C$ 라 정의하고,  $\alpha = 0$  일 때  $\theta = -A$ 인 조건을 대입하면,  $\theta = 2\alpha - A$ 가 된다. 또한,  $L = L_0 + L'$ 라 하면, 기준 좌표계에 대한 목표점 P의 3차원 위치값  $x, y, z$ 는 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} x &= L \cos(\theta) \cos(\phi) \\ y &= L \cos(\theta) \sin(\phi) \\ z &= L \sin(\theta) \end{aligned} \tag{1}$$

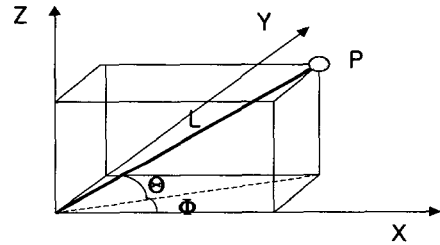


그림 4. LTS의 구좌표계.  
Fig. 4. Spherical measurement system for LTS.



그림 5. 시제품으로 개발된 LTS.  
Fig. 5. Developed laser tracking system.

그림 5는 본 논문에서 시제품으로 개발한 LTS로서,

LTS 본체 및 제어기, 그리고 성능 평가 실험 장치의 모습을 나타낸다. 여기서, 성능평가 실험장치는 LTS의 정적 및 동적 특성을 파악하기 위하여 1축 리니어모터와 LVDT 변위센서로 구성하였다. X, Y, Z축 각각에 대한 정밀도 측정을 할 수 있도록 1축 모터를 3방향으로 이동 설치가 가능하도록 설계하였으며, 장착된 LVDT는 300 mm의 측정 거리, 5 $\mu$ m의 정밀도를 갖고 있다.

### III. LTS 성능 실험

#### 1. 레이저 인터페로미터 거리 측정 실험

레이저 인터페로미터 거리 정밀도 측정 실험에 앞서 먼저 레이저 인터페로미터의 안정성 및 오차 정밀도 측정 실험을 하였다. 즉, 한 점을 계속적으로 측정하여 그 오차 범위 및 오차 정밀도를 살펴보았다. 그림 6은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 본 LTS에서 사용된 레이저 인터페로미터는 약  $\pm 0.5 \mu$ m의 정밀도를 갖고 있음을 알 수 있다.

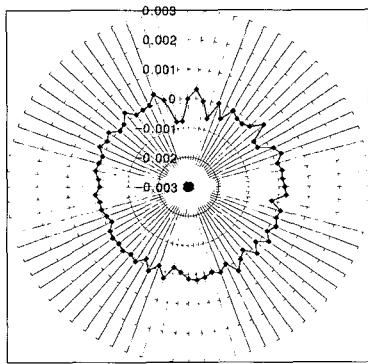


그림 6. 레이저 인터페로미터 거리 정밀도 측정 실험 결과.  
Fig. 6. Experimental results for the accuracy of laser interferometer.

그림 7은 개발된 LTS의 사용자 화면을 나타낸 것으로, 각 샘플링 시간마다 측정된 거리데이터 및 계산된 X, Y, Z축의 위치 데이터를 표시한다. 또한, X-Y, Y-Z, Z-X 평면 상에 측정 결과를 그림으로 표시함으로써 목표물의 3차원 공간상에서의 이동 경로를 파악할 수 있도록 하였다.

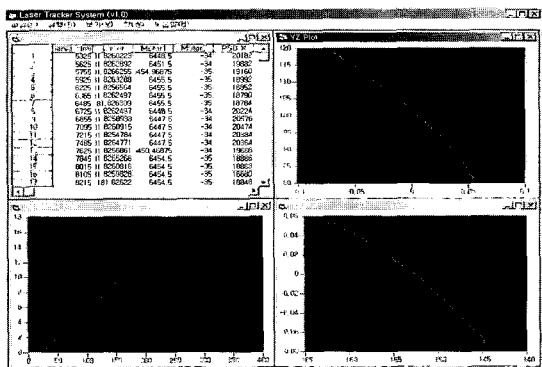
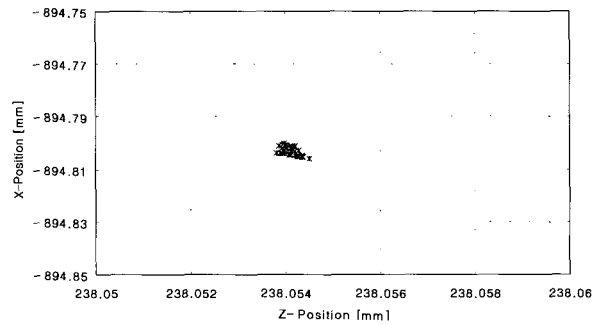


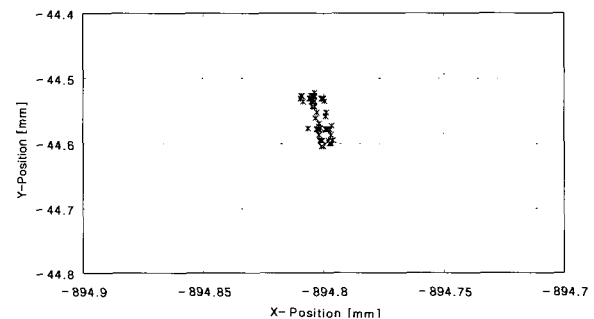
그림 7. 선형 운동에 대한 3차원 위치 측정 결과.  
Fig. 7. Test results for the 3-D measurement of linear motion.

#### 2. 반복 위치 정밀도 측정 실험

개발된 LTS의 성능을 평가하기 위해서는 절대위치 측정 정밀도와 반복 위치 정밀도를 측정하여야 한다. 절대위치 측정 정밀도 실험은 기존의 상용 위치 측정 장비와의 비교실험 및 성능평가 실험장치를 통하여 수행될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 그 첫 단계로서 반복 위치 정밀도 측정 실험을 수행하였다.



(a) X-Y 평면



(b) Z-X 평면

그림 8. 고정 점에 대한 반복 정밀도 실험 결과.  
Fig. 8. Repeatability test results for the fixed point.

그림 8은 1m 떨어진 고정점에 대한 3차원 위치 좌표 측정에 대한 결과 그래프로서, 한 점을 반복적으로 측정하였을 때의 실험 결과를 나타낸다. X-위치는 20  $\mu$ m 이내의 범위에서 모두 측정되었으며, Y-위치는 80  $\mu$ m의 범위로, Z-위치는 1  $\mu$ m 이내의 범위로 측정되는 결과를 보이고 있다. 따라서, 현 시스템의 위치 반복 정밀도는  $\pm 42 \mu$ m로서 1차 위치 정밀도 목표 수준에는 도달한 것으로 측정되었다.

### IV. 결론

본 논문에서는 산업용 로봇의 정밀도를 계측할 수 있는 3차원 위치 정밀도 측정 시스템인 LTS를 개발하였다. 제작 정밀도를 높이기 위하여 광학부품을 일체로 설치할 수 있도록 설계하였으며, PSD와 고정도의 DD 모터를 이용 tracking 제어를 수행하였다. 개발된 LTS 시스템은 위치 측정 가능 범위가 10m 이상, 각 축별 위치 정밀도가 X-축 ( $\pm 10 \mu$ m), Y-축 ( $\pm 40 \mu$ m), Z-축 ( $\pm 1 \mu$ m)으로 전체적으로  $\pm 42 \mu$ m의 정밀도를 갖는 시스템이다. 이는 로봇의 위

치 정밀도 측정 수준인  $\pm 10\mu m/m$ 에는 미흡한 결과이나, PSD 오차 정밀 제어 알고리즘 개발 및 LTS 기구 메커니즘의 calibration으로 그 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

개발된 로봇의 위치 정밀도 측정 시스템은 로봇을 개발할 때 또는 calibration할 경우 유용하게 사용될 것이며, ISO 규격에 준거한 시험을 수행할 수 있도록 User Interface S/W를 보완한다면, 업체의 개발품에 대한 측정, 검사 및 평가 수행할 수 있을 것이다. 아울러, 개발된 측정 시스템은 선진국의 1/2수준으로 저가격화하여 무인 운반차 등 이동체의 위치 측정 센서로서 또는 정밀 공작기계의 위치 정밀도 측정 센서로서 연구와 제작 현장에서 많은 활용이 기대된다.

본 논문에서 개발한 LTS가 ISO 규격의 모든 시험을 만족시킬 수 있을만한 충분한 성능을 갖추기 위해서는 많은 보완이 필요한 것으로 판단된다. 현재 시스템의 위치 정밀도 향상을 위해서는 PSD 오차값을 거리 정보로서 보완시키는 알고리즘이 필요하며, 향후 레이저와 각종 광학부품, 그리고 미러축의 부정합을 보상하는 오차 모델링 해석 및 이에 대한 보상 알고리즘에 대한 보완 연구가 수행될 예정이다.

**참고문헌**

[1] H. V. Brussel, "Evaluation and testing of robots,"

*Annals of the CIRP*, vol. 39, pp. 657-664, 1990.

[2] "Manipulating industrial robots-performance criteria and related test methods," *ISO 9283*, 1998.  
 [3] "Manipulating industrial robots-informative guide on test equipment and metrology methods of operation for robot performance evaluation in accordance with ISO 9283," *ISO/TR 13309*, 1995.  
 [4] C. J. Leigh-Lancaster, B. Shirinzadeh, Y. L. Koh, "Development of a laser tracking system," *Proceedings of 4th Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 163-168, 1997.  
 [5] T. A. Greenwood, "Rapid contour measurement of composite structures utilizing a 3D tracking Interferometer," *Leica Practice Report*, 1993.  
 [6] 이호길 외, "로봇 성능평가 지원체계 구축: 로봇의 위치 정밀도 측정 시스템 개발," 한국생산기술연구원, 1999.  
 [7] H. Zhuang and Z. S. Roth, "Modeling gimbal axis misalignments and mirror center offset in a single-beam laser tracking measurement system," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 14, no. 3, 1995, pp. 211-224.



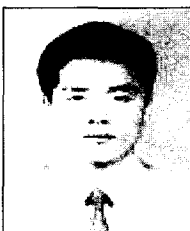
**황 성 호**

1965년 8월 18일생. 1988년 서울대 기계설계학과 졸업. 동대학원 석사(1990), 동대학원 박사(1997). 1992년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원. 관심분야는 차량 사시 시스템, 유공압 시스템, 건설용 로봇 제어 및 응용.



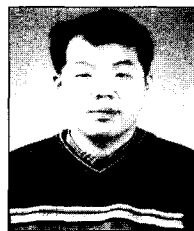
**이 호 길**

1953년 1월 5일생. 1980년 한양대 기계공학과 졸업. 오사카 대학교 석사(1986), 동대학원 박사(1989). 1989년~1991년 교토 고도 기술연구소 주임연구원, 1991년~현재 한국생산기술연구원 수석연구원. 관심분야는 건설용 로봇 제어 및 응용, 가상 현실.



**최 경 락**

1962년 11월 14일생. 1985년 한양대 기계과 졸업. 동대학원 석사(1987). 1988~1990 한국과학기술연구원, 1991~현재 한국생산기술연구원 선임연구원. 관심분야는 신호 측정 분석 및 시험기용 제어기 개발.



**김 진 영**

1967년 9월 3일생. 1991년 성균관대 기계설계학과 졸업. 동대학원 석사(2001). 1992년~현재 한국생산기술연구원 연구원. 관심분야는 로봇 제어, 가상 현실.