

## R-LAT Sensor를 이용한 산업용 매니퓰레이터 공간좌표 정밀계측에 관한 연구

김태화\*, 문성호\*\*, 홍정표\*\*\*, 원태현\*\*\*, 권순재\*\*\*\*

한국폴리텍 항공대학\*, 니콘인스트루먼트\*\*, 동이과학대학\*\*\*, 부경대학교\*\*\*\*

### A study on the precision measurement of spatially coordination of the industrial manipulator using the R-LAT Sensor

Tae-Hwa Kim\*, Sung-Ho Moon\*\*, Jeng-Pyo Hong\*\*\*, Tae-Hyun Won\*\*\*, Soon-Jae Kwon\*\*\*\*

Korea Aviation Polytechnic\*, Nikon Instruments NV\*\*, DongEui Institute of Technology\*\*\*, Pukyong National Univ.\*\*\*\*

**Abstract** - 실내공간상에서 3차원 실시간 위치를 결정하는 다양한 측지방법들이 존재하지만 100 $\mu$ m 이하 계측기 수준의 정밀도를 측정하는 방법은 여전히 Laser Theodolite 신호를 사용할 수밖에 없다. Rotary-Laser Automatic Theodolite(R-LAT)는 Fan Laser Beam을 주사하면서 회전시킨 후 주어진 공간의 수직과 수평을 계측하는 Laser Transmitter의 한 종류이다. 본 논문에서는 R-LAT에서 발생하는 Fan Laser Beam 신호를 취득할 수 있는 센서와 증폭회로의 개발을 통하여 3차원 공간좌표에 대한 회전변환행렬로 이루어진 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 기존 Laser Tracker에서 구해지는 공간좌표와 상호 비교하였다.

더 상세하게 살펴보면, Rotary-Laser Automatic Theodolite를 통해 주기적으로 발생하는 Fan Laser Beam 측정을 기본으로 세 개 이상의 R-LAT Transmitter를 인공위성과 같이 주어진 공간상에 설치한 후 각각의 R-LAT Transmitter가 주사되는 Fan Laser Beam을 3차원 원추 공간상에서 인식하는 기술을 말하는 것이다. 다음 그림.2와 표.1은 Nikon Instruments NV에서 개발된 R-LAT Transmitter(iGPS™)의 개념과 주요 제원을 나타낸 것이다.[9]

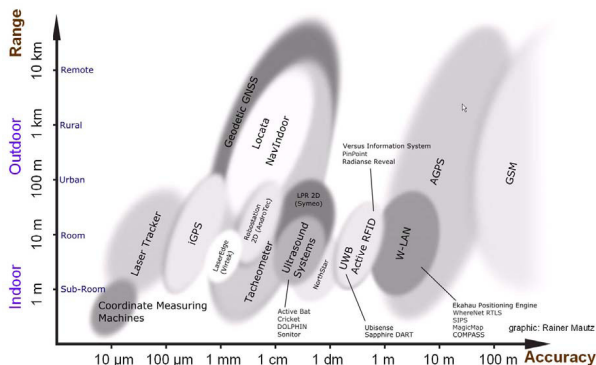
## 1. 서 론

일반적으로 산업용 수직 다관절 로봇은 사전에 프로그램된 이동경로를 따라 단순히 물체를 파지하여 옮기는 Pick & Place 작업에 국한되어 사용되어지고 있지만 최근에는 로봇 관절에 적용된 Servo Motor의 Torque가 커지고 회전력 전달 기구의 정밀도가 높아지면서 기계적 가공 분야인 Drilling과 Deburring 등에 적용되기 시작했다. 특히 유럽 국가들을 중심으로 고가의 전용장비와 치공구를 대체하기 위한 새로운 수단으로 항공기 조립 지원장비나 항공기 동체 가공용 응용장비 개발에 산업용 로봇을 적용하는 방안을 활발하게 논의하고 있는 상황이다.[6][7][8]

하지만 산업용 로봇은 시리얼 링크 관절의 기구적인 특성과 기구적 외란으로 인해 로봇의 중심점에서 최대 리치 영역(Max Reach Area)으로 Arm이 이동할수록 위치 오차가 커지는 단점이 있고 이를 극복하기 위하여 Laser Tracker나 Vision 기술을 접목한 기술 등이 대안으로 제안되고 있지만 대형 구조물을 대상으로 하는 항공기 생산공정의 특수성으로 인해 이러한 기법마저도 심각한 공간위치 오차에 노출되는 경우가 흔히 발생하고 있다. 따라서 대형 구조물 가공에 투입되는 산업용 로봇의 End-Effector상에 고정된 TCP를 보다 정밀하게 제어하기 위해서는 3차원 공간 제어를 위한 새로운 접근방법에 대한 요구가 빈번히 발생하고 있다.

본 연구는 조립정밀도가 200 $\mu$ m이하로 엄격하게 제한되는 항공기 조립 공정 및 항공기 동체 가공공정에 산업용 로봇을 적용할 경우 로봇의 프로그램 경로를 엄밀하게 보정하기 위한 보조적 수단으로 고가의 Laser Tracker 보다 경제적인 Rotary-Laser Automatic Theodolite를 통한 정밀 공간계측 방안을 제안하고 실험을 통해 결과를 비교하였다.

다음 그림.1은 최근에 논의되고 있는 실내공간상 3차원 실시간 위치 계측다바이스들에 대한 성능을 정리한 것이다.[1]

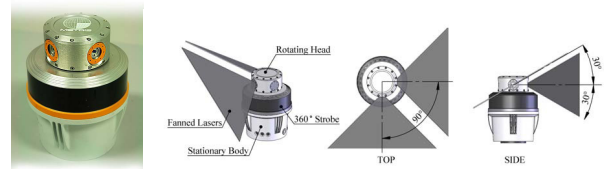


〈그림 1〉 3차원 실내공간상 공간 측지방법의 종류

## 2. 본 론

### 2.1 R-LAT Transmitter 주파수 측정을 위한 센서 개발

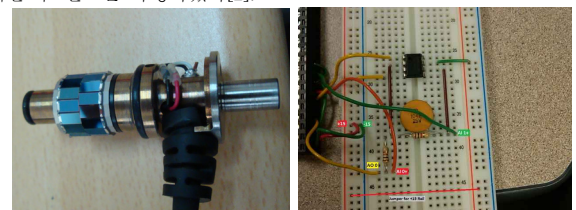
iGPS™는 1997년 미국 ArcSecond에서 특허를 취득하여 현재 미국 Nikon Instruments NV에 특허기술을 공여한 첨단기술 중 하나이다. 좀



〈그림 2〉 미국 Nikon Instruments NV사의 R-LAT인 iGPS™  
〈표 1〉 Nikon Instruments NV사 iGPS™ Transmitter 제원

Range	2 - 30 Meters, Maximum 55 Meters
Laser Frequency	780 nm CDRH Class I
Strobe Frequency	890 Hz
Rotation Rate	40-55 Hz
Angle Accuracy Metrology Grade (Horizontal and Vertical)	Single Measurement <40 uRAD (10 arc seconds) 2-second average <4.0 uRAD (< 1 arc second)
Angle Accuracy Industrial Grade (Horizontal and Vertical)	Single Measurement <45 uRAD (10 arc seconds) 2-second average <4.5 uRAD (< 1 arc second)
Size	140 x 140 x 191 mm
Weight	7 Lbs
Coverage	Horizontal : $\pm 180^\circ$ (360° total span) Vertical : $\pm 20^\circ$ (40° total)
Input Power	12 VDC @ 0.5 amps
Power	AC to 12 VDC
Temperature	Operation -10° C ~ 50° C

R-LAT Transmitter에서 발생하는 Laser 주파수를 취득하기 위하여 센서는 그림.3과 같이 Silicon Facets 형태의 Photodiode 32개를 사용하여 원통 Array 형태로 제작하였고 센서에서 발생하는 신호 취득을 위해 Signetics사 SN5211 OP-Amp를 사용하여 만든 증폭회로를 거친 다음 NI사에서 출시된 NI USB-4431 24bit Analog DAQ 모듈에 연결하여 Low-pass Filter 및 약 10nm bandwidth를 가지는 Laser 전용 필터를 설계한 후 신호를 측정하였다[2].



〈그림 3〉 개발된 Photodiode Array Sensor와 Amplifier회로

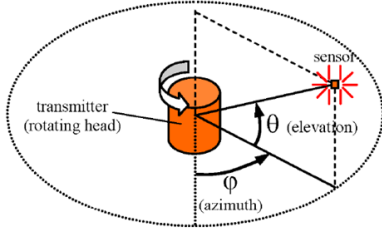
### 2.2 3차원 공간좌표 취득 방법 및 모델링

개발된 센서를 사용하여 공간상의 좌표를 수집하여 좌표변환을 수행하기 위해서는 일반적으로 다음 그림.4에 나타난 R-LAT Transmitter한 대에서 발생하는 Laser 신호를 센서가 취득하는 원리와 마찬가지로 이것을 일반 GPS 공간좌표를 사용하여 지구상 특정 공간상의 위치를 파악하는 것과 마찬가지로 다음의 네 가지 사항을 가정한 후 수학적 모델링을 수립하였다.[3][4]

(1) 센서가 놓여지는 평면은 Normal Vector상에서 완벽하게 구현가능

하다.

- (2) R-LAT Transmitter로부터 센서로 연결되는 레이저 신호(Line의 형태)는 수신위치에서 발신위치를 빼고 생성된 벡터 Data로 나타난다.
- (3) 레이저 신호라인은 주기적으로 회전하지만 항상 센서가 놓여진 평면안에 존재하고 신호를 형성한다.
- (4) R-LAT Transmitter는 최소 3개 이상 설치하여 동작시킨다.



〈그림 4〉 L-RAT 동작시 Sensor 신호 취득방법

따라서 상기 가정을 전제로 R-LAT 주파수가 발생하는 공간상에서 센서를 통해 취득되는 레이저 Signal을 계산하기 위한 일반식은 다음과 같이 두 가지로 정리할 수 있다. 먼저 R-LAT Transmitter와 센서의 관계에서 다음과 같은 식을 정리할 수 있다.

$$N(x, y, z)_i^{1 \times 3} \cdot [R(x, y, z)_k^{3 \times 1} - T(x, y, z)_i^{3 \times 1}] = 0 \quad [1]$$

여기서,

- $i$  는 R-LAT Transmitter의 index
- $j$  는 R-LAT Transmitter에 설치된 Fan Laser의 index
- $k$  는 센서의 index

$N(x, y, z)_i^{1 \times 3}$  은  $ij$ 번째 Transmitter Fan Beam에 대한 회전행렬

$R(x, y, z)_k^{3 \times 1}$  은  $k$ 번째 센서의 위치에 대한 회전행렬

$T(x, y, z)_i^{3 \times 1}$  은  $i$ 번째 R-LAT Transmitter의 위치에 대한 회전행렬이다. 그리고 두 번째로 정리되는 식은 R-LAT Transmitter의 Fan Laser Beam이 만들어내는 상관관계를 정리한 식으로 다음과 같다.

$$N(x, y, z)_i^{1 \times 3} = TR_{xyz}(rx, ry, rz)_i^{3 \times 3} \cdot M_z(\theta)_{ij}^{3 \times 3} \cdot P_{yz}(\phi, \alpha, \theta_{off})_{ij}^{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [2]$$

여기서,

$TR_{xyz}(rx, ry, rz)_i^{3 \times 3}$  는 R-LAT Transmitter  $i$ 에 대한 회전행렬

$rx, ry, rz$  는  $x, y, z$  축 각각에 대한 회전 각

$M_z(\theta)_{ij}^{3 \times 3}$  는  $ij$ 번째 측정,  $\theta$  는 시차 측정 각

$P_{yz}(\phi, \alpha, \theta_{off})_{ij}^{3 \times 3}$  는

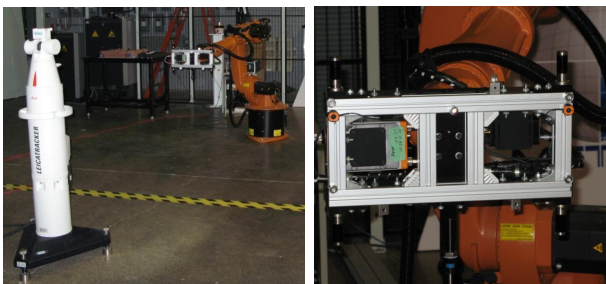
$\phi$  는 R-LAT Transmitter Fan Beam의 slant 각

$\alpha$  는 R-LAT Transmitter Fan Beam이 이루는 원추 각

$\theta_{off}$  는 R-LAT Transmitter Fan Beam의 Offset 값

$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  는 XZ평면을 대상으로 할때 기준평면을 각각 나타낸다.

### 2.3 실험장치 구성

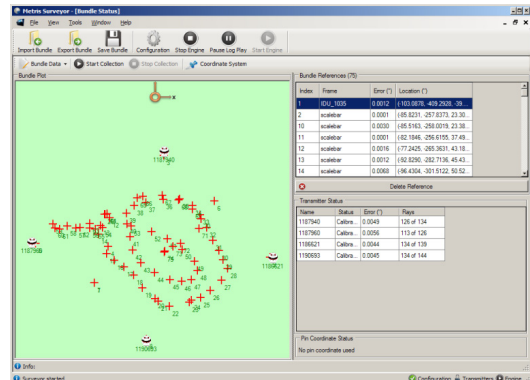


〈그림 6〉 산업용 로봇 공간좌표 Error Data 취득을 위한 장치 구성

본 연구에서 개발된 Sensor Detector의 성능을 입증하기 위하여 상기 그림.6과 같이 가만하중 20kg 산업용 로봇에 알루미늄 프로파일을 사용한 공간좌표 획득용 End-Effector를 제작하여 실험을 수행하였다.

알루미늄 프로파일에는 Sensor Detector의 정확한 신호 취득을 위해 그림.6의 우측그림과 같이 각각의 모터에 개발된 센서를 취부 하였으며 로봇 End-Effector가 이동하는 공간좌표의 실시간 추종을 위해 3차원 측정기 및 Laser Tracker에서 널리 사용하고 있는 SA(Spatial Analyser)를 사용하여 공간 좌표를 검증하였고 또한 개발된 Sensor Detector의 공간 추종능력을 입증하기 위하여 Leica사의 LTD 800 laser Tracker와 1/2" SMR를 사용하여 두 궤적을 비교 검증하였다. 아울러 산

업용 로봇의 공간이동 프로그램은 산업용 로봇용 표준 언어인 Karel 언어를 사용하여 공간 이동 프로그램을 작성한 후 Play-back을 실시하였다.



〈그림 6〉 SA(Spatial Analyser)를 사용한 센서 궤적의 표시

### 2.5 실험결과

다음 표.2는 개발된 센서를 산업용 로봇 End-Effector에 장착하고 동시에 Leica laser Tracker에서 End-Effector의 TCP Point를 추적하도록 설치한 후 1m<sup>3</sup>로 설정된 검사 체적 내에서 산업용 로봇이 사전에 프로그램된 고정점과 레퍼런스 지점을 20회 반복 이동하였을 때 나타난 각각의 공간좌표를 수집한 후 그 Data를 비교 검증한 결과이고 표.3은 검사 체적 1m<sup>3</sup> 내에서 사전에 프로그램된 경로를 따라 TCP가 이동할 때 한 점에서 다음 한 점까지의 길이에 대한 편차량을 상호 비교하여 약 380회(381 point) 측정된 것이다.

〈표 2〉 Best Fit(Absolute) : 1σ Standard Deviation(mm)

공간 오차 구분	개발된 센서	Laser Tracker
X Coordinate	0.035	0.018
Y Coordinate	0.048	0.023
Z Coordinate	0.051	0.028
3D Coordinate	0.097	0.041
# of Points Fit : 20		

〈표 3〉 Point to Point(Relative) : Combined Both Datasets

1σ Standard Deviation (mm)	0.081
AVG. Error (mm)	0.043
RMS. Error (mm)	0.058
# of Lengths : 380	

### 3. 결 론

본 연구에서는 항공기와 같은 대형 구조물을 대상으로 운용되는 산업용 로봇 End-Effector의 TCP에 대한 3차원 공간위치를 제어하기 위한 새로운 개념의 센서와 그 적용방법 그리고 알고리즘을 제시하였다. Signetics SN5211 Op Amp와 32개의 Photodiode array로 구성된 센서는 R-LAT에서 발생되는 Fan Laser 신호를 취득하는데 무리가 없었으며 또한 3차원 공간 위치를 취득하기 위한 수학적 알고리즘은 기구적 외란이 존재하는 산업용 로봇의 End-Effector가 이동하는 경로를 100 μm 범위 내에서 효과적으로 취득하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 개발된 Sensor를 조합하여 6-DOF Dynamic Tracking과 관련된 연구를 지속적으로 진행할 계획이며 이를 통하여 산업용 로봇의 프로그램 경로를 정밀하게 보정하는 보조센서모듈로 개발을 진행할 계획이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] D A Maisano, J Jamshidi, F Franceschini, P G Maropoulos, L Mastrogiacomo, A R Mileham, G W Owen, "A comparison of two distributed large-volume measurement systems: the mobile spatial coordinate measuring system and the indoor global positioning system", Proc. IMechE Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture, p511-p521, 2009
- [2] A.R. Norman, A. Schönberg, I.A. Gorchach, R. Schmitt, "Cooperation of Industrial Robots with Indoor-GPS", International Conference on Competitive Manufacturing '10, p511-p521, 2010
- [3] C. Depenthal and J. Schwendemann, "iGPS-a New System for Static and Kinematic Measurements," 9th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, p131-p140, 2009
- [4] R. Schmitt, A. Schönberg, and B. Damm, "Indoor-GPS based robots as a key technology for versatile production," Proceedings for the joint conference of ISR 2010 and ROBOTIK 2010, p199-p205., 2010