

## 힘/모멘트 측정기능을 갖는 6축 로봇 베이스 플랫폼 개발

### Development of a 6-axis Robotic Base Platform with Force/Moment Sensing

정성훈<sup>1\*</sup>, 김한성<sup>2</sup>

Sung Hun Jung<sup>1</sup>, Han Sung Kim<sup>2</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper present a novel 6-axis robotic base platform with force/moment sensing. The robotic base platform is made up of six loadcells connecting the moving plate to the fixed plate by spherical joints at the both ends of loadcells. The statics relation is derived, the robotic base platform prototype and the loadcell measurement system are developed. The force/moment calibrations in joint and Cartesian spaces are performed. The algorithm to detect external force applied at a working robot is derived, and using a 6-DOF robot mounted on the robotic base platform, force/moment measurement experiments have been performed.

*Keywords* : Position/force control, Cooperative robot, Gough–Stewart platform, Loadcell, Strain gauge, F/T sensor, Industrial robot, Collision detection

---

<sup>1\*</sup> 경남대학교 기계융합공학과  
E-mail: rpdmdrpd@naver.com,  
Mob.: 010-6556-3441

<sup>2</sup> 경남대학교 기계공학부 교수  
E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr, Tel.: 055-249-2627

<sup>1</sup> Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Kyungnam University

<sup>2</sup> Corresponding author, Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Professor

## 1. 서론

최근 작업자가 로봇 작업반경 안에서 협조작업을 할 수 있는 협동 로봇에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존 산업용 로봇에 필수적으로 적용된 안전 펜스의 설치 없이 작업자와 동일한 공간에서 협동 작업을 수행하기 위하여 충돌감지<sup>[1][2][3]</sup> 등의 안전성 확보 방안이 활발히 연구되고 있다. 작업로봇의 충돌감지는 작업로봇의 질량특성 파악이 먼저 이루어져야 하고, Harry West에 의해 힘과 모멘트를 측정하여 로봇의 질량특성을 추정하는 방법<sup>[4]</sup>이 제안되었다. 현재 힘과 모멘트를 측정하는 방법으로는 모터의 전류를 측정하는 방법(한화테크윈사의 HCR-5), 로봇의 조인트에 토크센서를 장착하여 측정하는 방법,<sup>[5]</sup> 작업로봇의 손목에 F/T 센서를 장착하여 측정하는 방법<sup>[6][7]</sup> 등이 제시되었다.

기존 힘/모멘트 측정방법으로 모터 전류 측정방법은 정밀한 신호처리 및 고속 역동역학 연산이 요구된다. 조인트 감속기 출력단에 토크센서를 장착하는 방법은 정밀한 힘/모멘트 측정이 가능하나 고가의 토크센서를 모든 조인트에 장착해야 한다는 한계가 있다. 작업로봇의 엔드이펙터에 F/T 센서를 장착하는 방법은 정밀 힘/모멘트 측정이 가능하나 로봇 암에 작용하는 힘/모멘트는 감지할 수 없고 고가의 F/T 센서를 사용해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 힘과 모멘트 측정을 위해 작업로봇의 기구부 베이스에 힘/모멘트 측정장치를 위치하는 방법<sup>[8][9]</sup>을 제안한다. 제안하는 방법은 외부의 힘/모멘트 감지를 위해 별도의 토크센서를 요구하지 않고 작업로봇의 기구부 베이스에 힘/모멘트 측정장치가 위치하므로 측정 민감도를 최대화할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 로봇 베이스 플랫폼의 정역학 해석방법을 제시한다. 병렬구조를 이용한 로봇 베이스 플랫폼의 기구부 및 측정부

설계방법을 제시한다. 조인트 및 직교공간 상에서 힘/모멘트 보정실험을 수행한다. 마지막으로 외부 힘 감지 알고리즘 및 6자유도 작업로봇을 장착하여 힘/모멘트를 측정된 실험결과를 제시한다.

## 2. 로봇 베이스 플랫폼 정역학 해석

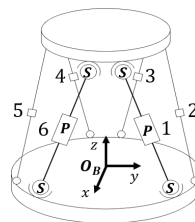
본 논문에서는 6-SPS (Spherical- Prismatic - Spherical) 병렬구조를 이용하여 6축 로봇 베이스 플랫폼을 설계하고자 한다. Fig. 1(a)는 6-SPS 구조를 갖는 Gough-Stewart platform의 기구학적 구조를 나타낸다. Fig. 1(b)은 로봇베이스 플랫폼 시작품을 나타내고 이는 인장/압축 로드셀(loadcell) 양단에 구형 조인트를 장착하여 이동플랫폼을 고정플랫폼에 지지하는 구조를 갖는다. 로드셀을 직선 조인트로 모델링할 수 있으나 변형이 매우 작으므로 이동플랫폼의 이동은 없다고 가정한다.

해석을 위하여 Fig. 2(a)와 같이  $O_B-xyz$ 와  $Q_B-uvw$ 는 각각 고정 및 이동 좌표계를 나타낸다. 고정 및 이동플랫폼에 부착된 구형 조인트의 위치를 다음과 같이 나타낸다.

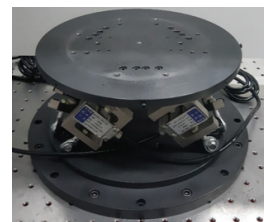
$$\mathbf{a}_i = r_a [\cos \lambda_i, \sin \lambda_i, 0]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{b}_i = r_b [\cos \lambda_i, \sin \lambda_i, 0]^T$$

for  $i = 1, \dots, 6$



(a) Gough-Stewart platform(6-SPS)



(b) Prototype

Fig. 1 6-axis robotic base platform

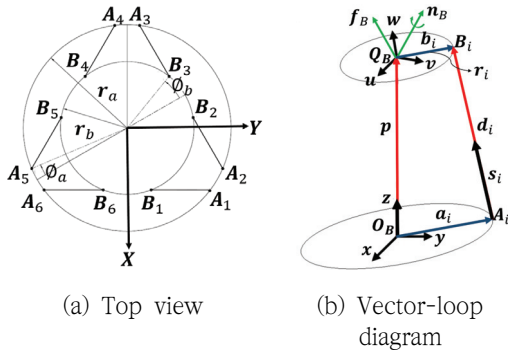


Fig. 2 Geometry of a robotic base platform

여기서  $r_a$ 와  $r_b$ 는 고정 및 이동플랫폼의 반경을 나타내고, 고정 및 이동플랫폼에 부착된 구형 조인트 사이의 사잇각의 반각을  $\phi_a$ ,  $\phi_b$ 라 할 때,  $A_i$ ,  $\lambda_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 A_i &= \frac{\pi}{3}i - \phi_a && \text{for } i = 1, 3, 5 \\
 A_i &= \frac{\pi}{3}(i-1) + \phi_a && \text{for } i = 2, 4, 6 \\
 \lambda_i &= \frac{\pi}{3}(i-1) + \phi_b && \text{for } i = 1, 3, 5 \\
 \lambda_i &= \frac{\pi}{3}i - \phi_b && \text{for } i = 2, 4, 6
 \end{aligned}$$

Fig. 2(b)와 같이 벡터 루프 방정식(vector-loop equation)은 다음과 같다.

$$d_i = R b_i + p + b_i - a_i \text{ for } i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 고정좌표계에서 표현된 이동좌표계의 회전변환행렬이고 회전이동이 없는 경우,  $R = I_{3 \times 3}$ 이다.

6-SPS 병렬구조를 갖는 로봇 베이스 플랫폼의 정역학 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_B = J \tau_B \quad (3)$$

여기서  $f_B$ 와  $n_B$ 을 이동플랫폼  $Q_B$ 점에 작용하는 힘과 모멘트라 할 때, 로봇 베이스 플랫폼의 렌치(wrench),  $w_B = [f_B^T, n_B^T]^T$ 이다. 로드셀의 양단에 구형조인트가 연결이 되므로 로드셀에는 인장/압축력만이 작용한다. 이 조인트 힘벡터를 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau_B = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T \quad (4)$$

$Q_B$ 점에 대하여 6-SPS 병렬기구의 자코비안 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_6 \\ r_1 \times s_1 & r_2 \times s_2 & \dots & r_6 \times s_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $i$ 번째 다리의 단위방향벡터인  $s_i$ 와 거리 벡터  $r_i = \overline{Q_B B_i}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s_i = d_i / \|d_i\|, \quad r_i = b_i \quad (6)$$

### 3. 로봇 베이스 플랫폼 시작품 설계

Fig. 1(b)와 같이 로봇 베이스 플랫폼<sup>[10]</sup>은 6-SPS 병렬구조를 갖고 사전연구로 설계된 시작품의 기구학적 변수를 Table 1에 나타내었다. 직선 조인트 위치에 S-beam의 인장/압축 로드셀을 사용하였고 이의 최대 측정값은 25kgf이다. 6개의 다리에 동일한 크기의 로드셀을 사용하였고 로드셀의 최대측정범위가 25kgf일 때, 정역학 관계를 이용하여 이동플랫폼  $Q_B$ 점에 계산되는 힘과 모멘트의 최대값은 Table 2와 같다. 만약, 다른 범위의 힘과 모멘트 측정이 필요하다면, 다른 측정범위의 로드셀만의 교체로 힘/모멘트 측정범위를 손쉽게 변경할 수 있다.

Table 1. Design parameters of a Robotic Base Platform

Design Parameters	Value
Radius of the fixed platform( $r_a$ )	110.576mm
Radius of the moving platform( $r_b$ )	72.993mm
Half angle at the fixed platform( $\phi_a$ )	10.627 °
Half angle at the moving platform( $\phi_b$ )	9.462 °
Initial height( $h_0$ )	74.980mm
Initial leg length( $d$ )	103.897mm

Table 2. Max. force/moment measurement range

Force/Moment	Value
$f_{x,max}$	546N
$f_{y,max}$	519N
$f_{z,max}$	1,082N
$n_{x,max}$	44.9Nm
$n_{y,max}$	38.9Nm
$n_{z,max}$	74.7Nm

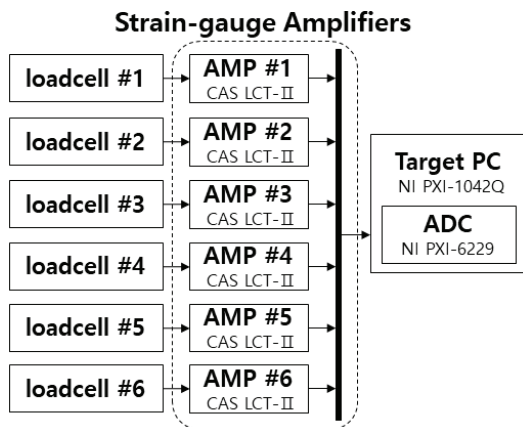


Fig. 3 Block diagram of the 6-axis force/moment measurement

본 연구에서는 CAS사의 로드셀(SBA-25L, 3mV/V, 25kgf)을 이용하여 로봇 베이스 플랫폼을 구성하였다. 로드셀 증폭기로는 CAS사의 LCT-II를 사용하였고, 이의 측정은 NI사의 PXI-6229 (16bit, 250kS/s, 32-ch AD)를 사용하여 측정부를 구성하였다. Fig. 3은 6축 힘/모멘트 측정부의 블록 다이어그램을 나타내고, Fig. 4는 측정시스템 구성도를 나타낸다. Fig. 5는 Simulink로 작성된 측정프로그램을 나타낸다.

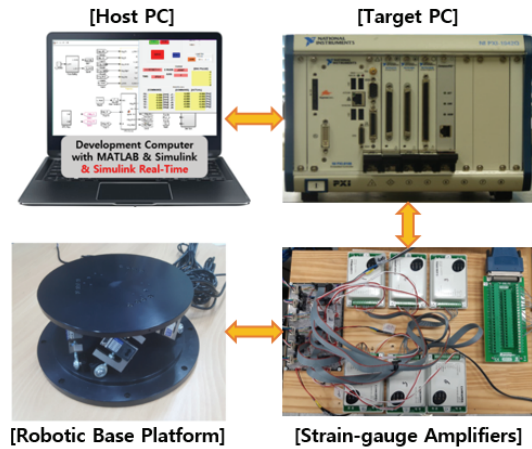


Fig. 4 System configuration of the robotic base platform

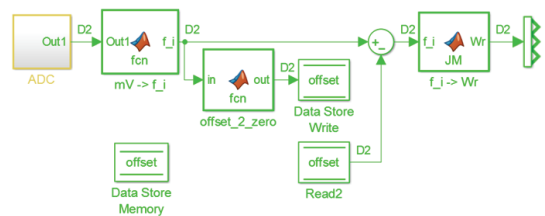


Fig. 5 Calibration program using Simulink and xPC

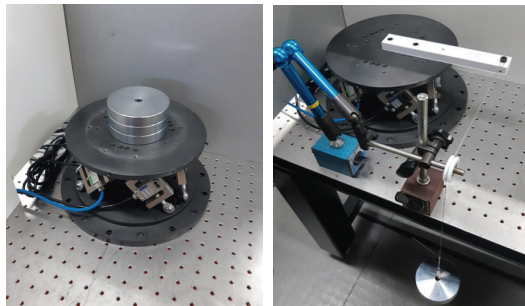
### 4. 로봇 베이스 플랫폼 측정실험

로봇 베이스 플랫폼의 정밀한 힘/모멘트 측정을 위하여 로드셀의 보정(calibration) 실험을 수행하였다. Fig. 7은 1축에 사용된 로드셀의 측정 및 보정실험 결과를 나타낸다. 대략 10N 간격으로 50N까지 무게추를 로드셀에 인가하여 측정실험을 수행하였다. Table 3은 6개 로드셀의 offset 및 slope 보정값을 나타낸다. 여기서 MATLAB의 polyval함수를 이용하여 1차식의 곡선피팅(curve fitting)을 수행하였다.

Table 3. Joint calibration result of loadcells

Joint	Offset	Slope
loadcell #1	0.0022	1.0043
loadcell #2	0.0614	1.0056
loadcell #3	-0.0309	0.9860
loadcell #4	0.1057	1.0016
loadcell #5	-0.0195	1.0202
loadcell #6	0.1213	0.9972

Fig. 6. 는 로봇 베이스 플랫폼의 힘/모멘트 측정실험을 위한 장치구성을 나타낸다. Fig. 6(a)



(a) Force ( $f_z$ ) measurement experiment

(b) Moment ( $n_z$ ) measurement experiment

Fig. 6 Force/moment measurement experiment setup

와 같이 대략 10N 간격으로 80N까지 무게추로 이동플랫폼에 x, y, z축 방향의 힘을 적용하였다. 모멘트는 Fig. 6(b)와 같이 이동플랫폼  $Q_B$  점에서 막대에 도르레를 이용하여 무게추로 모멘트를 생성하였다.  $n_x, n_y$ 는 대략 0.85Nm 간격으로 5.1Nm까지 모멘트를 인가하였고,  $n_z$ 는 대략 -2Nm 간격으로 -12Nm까지 모멘트를 인가하였다. 로봇 베이스 플랫폼에 적용한 힘과 모멘트 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프의 \*점은 측정점을 나타내고 점선은 이론값을 나타낸다. 직교 공간상에서의 보정결과를 Table 4에 나타내었다.

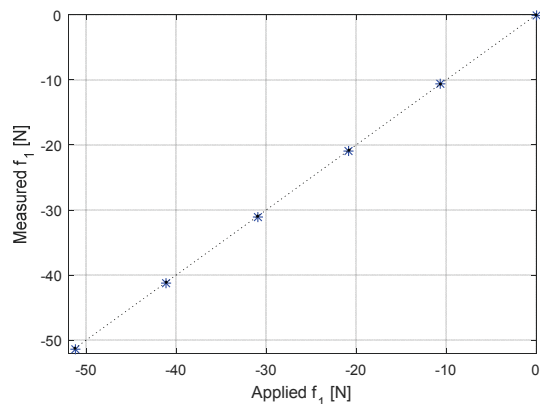


Fig. 7 Joint calibration experiment of loadcell #1

Table 4. Cartesian calibration result of the base platform

	$f_x$ [N]	$f_y$ [N]	$f_z$ [N]	$n_x$ [Nm]	$n_y$ [Nm]	$n_z$ [Nm]
Offset	0.071	-0.100	0.023	0.012	0.013	0.039
Slope	1.017	1.022	0.989	1.027	1.029	-1.015

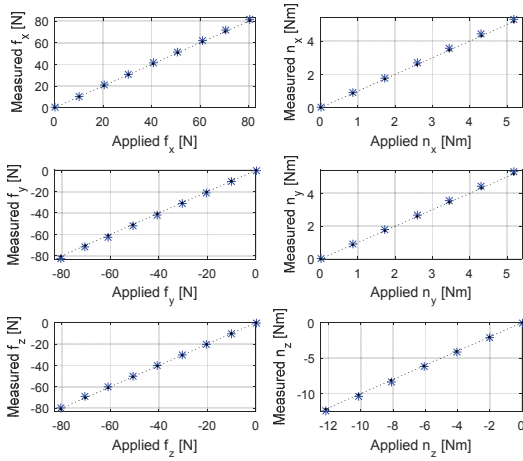


Fig. 8 Cartesian calibration experiment of the base platform

### 5. 외부 힘 감지 알고리즘

본 연구에서 개발한 로봇 베이스 플랫폼을 이용하여 외부 힘을 감지 할 수 있는 알고리즘 개요는 Fig. 9와 같다. 작업로봇 기구부 외부에서 가해진 렌치를  $w_E$ 로 정의하고, 작업로봇 기구부 자체 동역학으로 발생한 렌치를  $w_R$ 로 정의한다. 로봇 베이스 플랫폼에 작용하는 렌치의 합은  $w_B = w_R + w_E$ 로 되고, 이 렌치의 측정값을  $w_B^m$ 로 정의한다. 한편, 작업로봇 기구부 동역학이 로봇 베이스 플랫폼에 작용하는 렌치의 계산값을  $w_R^c$ 로 정의한다. 외부 힘은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$w_E^m = w_B^m - w_R^c \quad (7)$$

Fig. 10은 작업로봇의 링크 질량특성 모델링을 나타낸다. 링크의 무게로 인하여 로봇 베이스 플랫폼  $Q_B$ 점에서 생성되는 렌치  $w_R$ 을 구하는 방법

을 다음과 같이 유도한다.

먼저 작업로봇의 기구학적 모델 및 D-H 변수를 Fig. 11과 Table 6에 나타내었다. 위치계산을 위한  $4 \times 4$  동차 변환 행렬은 다음과 같다.<sup>[11]</sup>

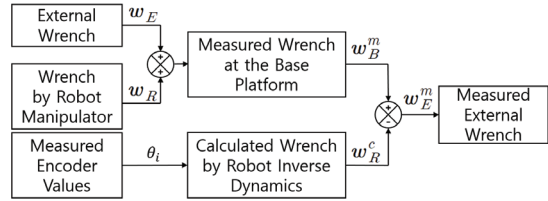


Fig. 9 External wrench detection algorithm

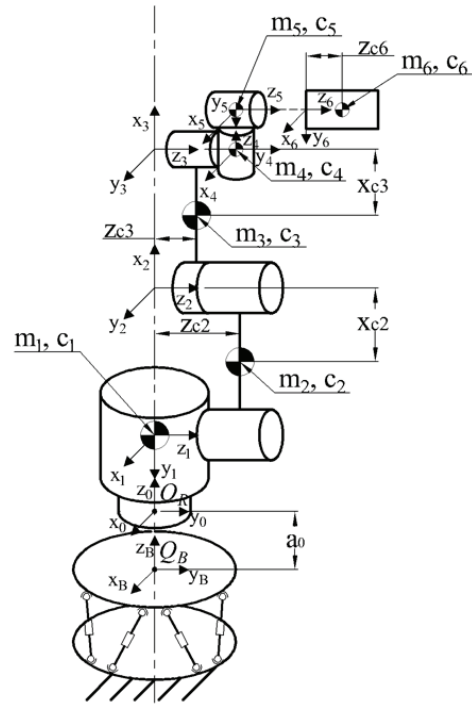


Fig. 10 Modeling of link masses of a 6-DOF robot

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

로봇 베이스 플랫폼의 기준좌표계( $Q_B$ - $uvw$ )에서 표현된  $Q_B$ 에서 작업로봇의 각 링크의 질량중심까지의 거리 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_{c1} &= {}^0T_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{r}_{c2} &= {}^0T_1 {}^1T_2 \begin{bmatrix} -x_{c2} \\ 0 \\ z_{c2} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{r}_{c3} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \begin{bmatrix} -x_{c3} \\ 0 \\ z_{c3} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{r}_{c4} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{r}_{c5} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{r}_{c6} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{c6} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서,  $a_0=35\text{mm}$ 이고, 작업로봇의 각 링크의 질량은 Table 5와 같이 추정하였다. 플랫폼 기준좌표계에서 계산된 힘과 모멘트 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_i = m_i \mathbf{g}, \quad \mathbf{n}_i = \mathbf{r}_{ci} \times \mathbf{f}_i \quad \text{for } i=1, \dots, 6 \quad (10)$$

여기서,  $\mathbf{g}=[0,0,-g_c]^T$ 이고,  $g_c$ 는 중력가속도이다. 따라서, 작업로봇의 링크 질량에 의한 로봇 베이스 플랫폼에 작용하는 렌치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \dots + \mathbf{f}_6 \\ \mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \dots + \mathbf{n}_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Table 5. Link masses of a 6-DOF robot

$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$
11.5kg	9.5kg	1.8kg	1.8kg	1.8kg	0kg

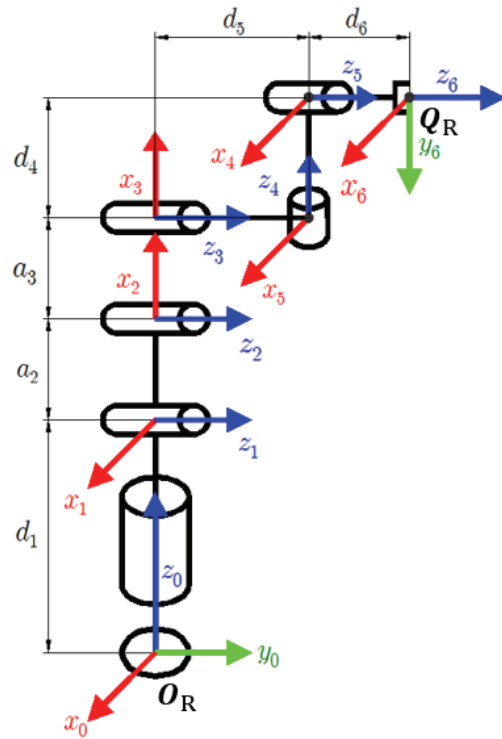


Fig. 11 Kinematic model of a 6-DOF robot

Table 6. D-H Parameters of a 6-DOF robot

Joint $i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$-90^\circ$	0	$d_1$ (87mm)	$\theta_1$ ( $0^\circ$ )
2	0	$a_2$ (400mm)	0	$\theta_2$ ( $-90^\circ$ )
3	0	$a_3$ (371mm)	0	$\theta_3$ ( $0^\circ$ )
4	$+90^\circ$	0	$d_4$ (109.8mm)	$\theta_4$ ( $+90^\circ$ )
5	$-90^\circ$	0	$d_5$ (99.5mm)	$\theta_5$ ( $0^\circ$ )
6	0	0	$d_6$ (52.5mm)	$\theta_6$ ( $0^\circ$ )



### 6. 작업로봇 동역학 측정실험

작업로봇 기구부 자체 동역학으로 발생한 렌치  $w_R$ 를 측정하기 위하여 Fig. 12와 같이 6축 작업로봇을 로봇 베이스 플랫폼에 장착하였다. Fig. 13-15는 작업로봇의 엔드이펙터  $Q_R$ 을 -80mm에서 +80mm까지 각각 x, y, z축으로 이동시키면서, 측정한  $w_B^m$ 과 식(11)으로 계산한  $w_R^c$ 을 나타내었다. 여기서  $w_B^m$ 는 작업로봇을 정지상태에서 측정한 값으로 작업로봇의 관성력은 고려되지 않았다. 측정값과 계산값의 최대오차는  $f_x=4.95N$ ,  $f_y=6.81N$ ,  $f_z=8.29N$ ,  $n_x=-0.23Nm$ ,  $n_y=-1.45Nm$ ,  $n_z=0.42Nm$  이다. 또한 Fig. 13-15에서  $Q_R$ 점을 x, z축으로 움직일 때,  $n_y$ 값의 비교적 큰 변화가 발생하고, y축으로 움직일 때  $n_x$ 값의 비교적 큰 변화가 발생함을 알 수 있다.



Fig. 12 Measurement experiment of a 6-DOF robot arm mounted on the base platform

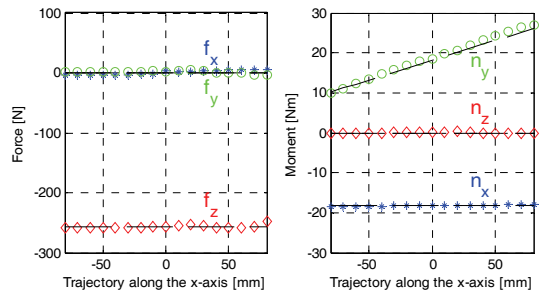


Fig. 13 Measured and calculated wrench along x-axis

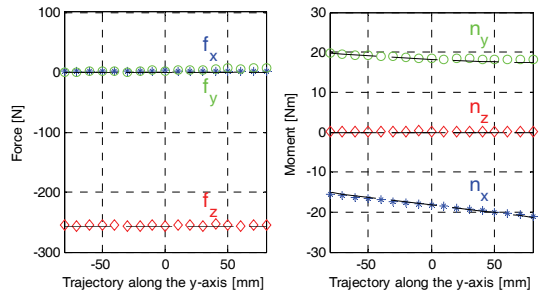


Fig. 14 Measured and calculated wrench along y-axis

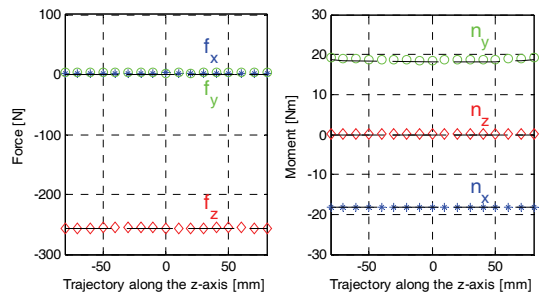


Fig. 15 Measured and calculated wrench along z-axis

동적궤적에 대한 작업로봇의 동역학 측정을 위하여 Fig. 16과 같이 x, y, z축으로 직선 이동하는 궤적을 작성하였고 이동궤적에 대한 로봇 베이스 플랫폼 측정값  $w_B^m$ 와 로봇 동역학 계산값  $w_R^c$ 을 Fig. 17에 나타내었다. 여기서 외부 힘  $w_E$ 가 작용하지 않은 상태에서  $w_B^m$ 를 측정하였으므로 작업로봇 기구부 자체 동역학으로 발생한 렌치  $w_R$



Table 7. Max. wrench error between  $w_B^m$  and  $w_R^c$

$w_B^m - w_R^c$	$f_x$ [N]	$f_y$ [N]	$f_z$ [N]	$n_x$ [Nm]	$n_y$ [Nm]	$n_z$ [Nm]
$Error_{MAX}$	+9.969	+12.06	-12.2	+1.78	-1.02	+0.602

만 측정되었다. Fig. 17에서 측정값  $w_B^m$ 의 x, y, z 성분을 각각 파란색, 초록색, 빨간색 실선으로 나타내고, 로봇 동역학 계산값  $w_R^c$ 는 검정색 실선으로 나타내었다. Fig. 17과 같이 측정값과 계산값의 오차는 궤적전체에서 비교적 작음을 알 수 있고, 각 성분별 최대오차를 Table 7에 나타내었다.

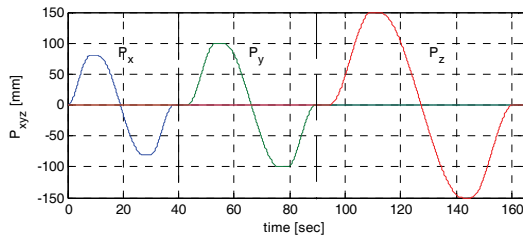


Fig. 16 Trajectory planning of a 6-DOF robot

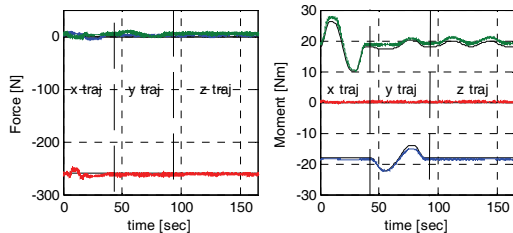


Fig. 17 Comparison of  $w_B^m$  with  $w_R^c$

## 7. 결론

본 논문에서는 기존 산업용 로봇과 협동로봇에서 사용된 F/T 센서, 토크센서 등을 이용한 힘/모멘트 감지방법보다 측정 민감도가 높고 경제적인

6축 힘/모멘트 측정방법을 제시한다. 제안하는 로봇 베이스 플랫폼은 6-SPS 병렬구조에 비교적 저가의 인장/압축 로드셀을 각 다리에 장착하여 6축 힘/모멘트를 측정하는 방법이다.

상용 인장/압축 로드셀을 사용하여 로봇 베이스 플랫폼의 기구부 및 6축 로드셀 측정부를 개발하였고 조인트 및 직교 공간상에서 힘/모멘트 보정 실험을 수행하였다. 작업로봇을 플랫폼상에 장착하고 작업로봇에 외부 힘이 작용하였을 때 이를 감지할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 실제 6자유도 작업로봇을 플랫폼에 장착하고 x, y, z축 직선이동 궤적에 대하여 작업로봇 동역학의 측정값과 계산값을 비교하였다. Table 7과 같이 힘과 모멘트의 최대오차가  $\pm 12.2\text{N}$ (최대값의 3.3%) 및  $\pm 1.78\text{Nm}$ (최대값의 6.8%) 이내임을 확인하였다. 향후 연구는 로봇 베이스 플랫폼을 이용하여 작업로봇의 충돌감지 및 직접교시 실험을 수행하고자 한다.

## 후기

본 논문은 중소벤처기업부의 월드클래스300프로젝트 R&D지원사업(과제번호: S2641371)을 통해 개발된 성과이고 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Haddadin, S., Luca, A. D., Albu-Schaffer, A. 2017. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification. *IEEE Transactions on Robotics*. VOL. 33, NO. 6, pp. 1292 – 1312.
- [2] Haddadin, S., Albu-Schaffer, A., Hirzinger, G. 2010. Safety Analysis for a Human-Friendly Manipulator. *Int J Soc Robot 2*: 235-252.
- [3] Zinn, M., Khatib, O., Roth, B. 2004. A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 4-5, April-May, pp 379-398.
- [4] West, H., Papadopoulos, E., Dubowsky, S., Cheah, H. 1989. A Method For Estimating The Mass Properties Of A Manipulator By Measuring The Reaction Moments At Its Base. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Scottsdale, USA, pp. 1510 – 1516.
- [5] Hirzinger, G., Albu-Schaffer, A., Hahnle, M., Schaefer, I., Sporer, N. 2001. On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. *IEEE International Conference on Robotics & Automation Seoul, Korea*, May 21-26.
- [6] Li, Y. F., Chen, X.B. 1998. On the Dynamic Behavior of a Force/Torque Sensor for Robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, Vol. 47, No. 1, February.
- [7] Kim, H. S. 2018. Design of a 6-axis Compliance Device with F/T Sensing for Position/Force Control. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*.
- [8] Morel, G., Dubowsky, S. 1996. The Precise Control Of Manipulator With Joint Friction : A Base Force/Torque Sensor Method. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Minneapolis, Minnesota, pp. 360 – 365.
- [9] Iagnemma, K., Morel, G., Dubowsky, S. 1997. A Model-Free Fine Position Control Method Using The Base-Sensor: With Application To A Hydraulic Manipulator. *IFAC Robot Control*. Nantes, France, pp. 339 – 345.
- [10] Kim, H. S. 2019. 6-axis BasePlatform Device With Force/Moment Sensing Capability. KR10-1952043.
- [11] Tsai, L. W. 1999. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons, Inc.

---

(접수: 2019.03.28. 수정: 2019.04.26. 게재확정: 2019.05.28.)