

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: MD94-D-01)에 의하여 연구되었습니다.

# Stewart Platform 방식의 6축 힘-토크 센서에 관한 실험적 해석

한정훈\*, 강철구\*\*

## An Experimental Analysis on the Stewart Platform-Based 6 Axis Force-Torque Sensor

J.-H. Han\* , C.-G. Kang\*\*

### ABSTRACT

The paper presents the experimental analysis of a Stewart platform-based force-torque sensor. The closed-form solution of forward kinematics of the Stewart platform is derived approximately by way of a linearization technique, and the solution is used in the force analysis of the force-torque sensor. An experimental studies show that the proposed method including gravity compensation algorithm is valid for Stewart platform-based force-torque sensors. The performance of the developed force-torque sensor is evaluated in view of accuracy and linearity in measurements.

**Key Words** : Stewart Platform(Stewart 플랫폼), Force-Torque Sensor(힘-토크 센서), Experiment(실험), Linearization(선형화), Gravity Compensation(중력보상)

### 1. 서론

세 방향의 힘과 세 방향의 토크를 측정할 수 있는 힘-토크 센서는 조립, 그라인딩, 디버링과 같은 기계가공작업이나, 일반적인 미세작업 등 힘 되먹임 제어가 필요한 곳에 유용하게 사용될 수 있으며, 많은 연구자들로부터 관심을 받아 왔다<sup>(1-5)</sup>. 실제로 산업현장에서 쓰여지고 있는 상용화된 힘-토크 센서로는 JR3 Inc., Advanced Technologies Inc. 등에서 개발된 것들이 있으며, 이들은 모두 스트레인 게이지를 이용한 센서들이다.

다른 형태의 힘-토크 센서로서 Stewart 플랫폼 기구를

이용한 힘-토크 센서가 최근에 많이 연구되고 있다.<sup>(2,4,11)</sup> 이 방식의 힘-토크 센서는 센서 재질의 내부응력이 측정에 영향을 미치지 않으며, 구조적 강성이 높고, 조립작업 시 필요한 수동 컴플라이언스(passive compliance)를 가지는 장점이 있다.

Stewart 플랫폼<sup>(6)</sup>은 원래 항공기 시뮬레이터를 위하여 제안되었던 기구이다. Gaillet and Reboulet는 고정된 Stewart 플랫폼 기구의 각 다리에 센서를 부착하여 힘-토크 정보를 얻을 수 있음을 보였으며, Kerr<sup>(9)</sup>는 탄성체 다리를 가진 Stewart 플랫폼이 힘-토크 센서에 적용될 수 있음을 제안하였다. Nguyen 등<sup>(4)</sup>은 Stewart 플랫폼

\* 고등기술연구원 생산기술연구실

\*\* 건국대 기계공학과

형태의 힘-토크 센서를 제작하여 실험하였으나, 힘과 토크를 얻기 위하여 순기구학을 수치해석적으로 풀어야 하는 문제점을 지니고 있다. Gaillet 등<sup>(2)</sup>은 Stewart 플랫폼 방식의 힘-토크 센서를 정적 구조물로 해석하여 힘-토크 정보를 얻어 낼 수 있음을 실험을 통하여 보였다. 변용규<sup>(10)</sup> 등은 6자유도 위치/자세 및 힘-모멘트 측정장치가 일체화된 Stewart 플랫폼 방식의 로봇손목기구에 관한 연구를 수행하였다. 허훈<sup>(11)</sup> 등은 로봇 말단장치(end effector)용 힘-토크 센서를 1자유도 힘-토크센서의 제작을 통해 실현 가능성을 검토한 바 있다. Kosuge 등<sup>(5)</sup>은 Stewart 플랫폼의 입출력 힘을 해석할 때 힘과 토크를 따로 고려하여야 한다고 주장하였다. 안병준<sup>(13)</sup> 등은 힘-모멘트 조작성 다원체의 체적을 정량화하는 방정식을 제시하고, 그것을 성능지수로 하여 설계변수를 결정할 수 있음을 보였다. 허금강 등<sup>(1)</sup>은 차원이 다른 힘과 토크를 동시에 고려하여 힘-토크의 최적설계를 수행하였다.

본 논문에서는 탄성 다리들(elastic legs)을 가진 Stewart 플랫폼 형태의 힘-토크 센서를 설계 제작하고, 실험을 통해 그 성능을 평가한다. 또한 6개의 다리에 작용하는 힘으로부터 상판에 작용하는 힘과 토크를 계산하는 기법을 보이고, 센서 자중에 의해 발생하는 힘-토크의 영향은 중력보상(gravity compensation) 알고리즘을 이용하여 해결할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 힘-토크 센서의 역기구학과 순기구학의 해를 구하고, 그것으로부터 힘-토크를 계산해내는 기법을 보인다. 3절에서는 Stewart 플랫폼방식의 6축 힘-토크 센서의 상·하판 반경, 다리길이, 관절사이의 간격을 토대로 제작된 센서와 전체 실험장치에 관해 설명한다. 4절에서는 실험결과를 보이고 분석하며, 5절에서 결론을 기술한다.

## 2. 힘과 토크의 계산기법

Stewart 플랫폼형 6축 힘-토크센서의 기구학적 해석은 Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 하부조인트  $A_i (i=1, \dots, 6)$ 를 연결하는 하부조인트 원과 상부조인트  $B_i (i=1, \dots, 6)$ 를 연결하는 상부조인트 원, 그리고 그 조인트들을 연결하는 다리를 기본 파라미터로 두고 수행한다. 하판(lower plate)의 좌표계  $\{A\}$ 는 하부조인트 원의 중심  $O_A$ 에 고정되어 있고, 상판(upper plate)의 좌표계  $\{B\}$ 는 상부조인트 원의 중심  $O_B$ 에 있다. 실제 제작된 힘-토크 센서의

물리적인 상판과 하판은 조인트 원으로부터 일정한 높이의 차이를 가지고 있다.

6개 다리의 길이를 벡터  $l_i = (l_1, \dots, l_6)^T$ 로 표시하고, 상판좌표계의 위치(position) 및 방향(orientation)을  $x = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)^T$ 라고 하자. 여기서  $(x_c, y_c, z_c)^T$ 는 상판좌표계 중심  $O_B$ 의 위치를 좌표계  $\{A\}$ 로 표현한 값이고,  $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 는 상판 좌표계를  $x_A$  축으로  $\alpha$ (roll),  $y_A$  축으로  $\beta$ (pitch),  $z_A$  축으로  $\gamma$ (yaw) 회전시킨 것을 의미한다. 그러면 주어진  $x$ 로부터  $l_i$ 를 구하는 역기구학(inverse kinematics)은 다음과 같이 구해진다.

$$l = g(x) \tag{1}$$

$$l_i = \sqrt{l_i^T l_i}, \quad l_i = {}^A_B R^B b_i + {}^A d - {}^A a_i \quad (i=1, \dots, 6)$$

여기서  ${}^A a_i$ 는 좌표계  $\{A\}$ 로 표현한  $A_i$ 의 위치벡터,  ${}^B b_i$ 는 좌표계  $\{B\}$ 로 표현한  $B_i$ 의 위치벡터,  ${}^A d = (x_c, y_c, z_c)^T$ 는 좌표계  $\{A\}$ 로 표현한 상판 좌표계 원점  $O_B$ 의 위치벡터,  ${}^A_B R$ 는 좌표계  $\{B\}$ 로 표현된 좌표를 좌표계  $\{A\}$ 로 변환하는 회전행렬이고,  $l_i$ 는 다리  $i$ 의 길이와 방향을 좌표계  $\{A\}$ 로 표현한 다리 벡터이다.

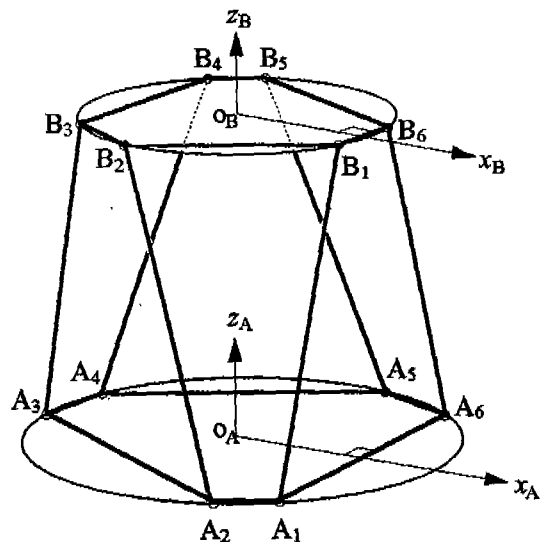


Fig. 1 Kinematic structure of Stewart platform and body-attached coordinate frames

Stewart 플랫폼의 순기구학(forward kinematics)은 주어진 다리길이 \$l\$로부터 상판의 위치 및 방향 \$\mathbf{x}\$를 구하는 문제이다. Stewart 플랫폼의 순기구학은 삼각함수를 포함하는 비선형 방정식이므로 풀기가 매우 어려우나, 본 논문에서 고려하는 Stewart 플랫폼에 대해서는 선형화를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + J^{-1}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{l} - \mathbf{l}_0) \quad (2)$$

여기서 \$\mathbf{x}\_0 = (0, 0, z\_0, 0, 0, 0)\$, \$\mathbf{l}\_0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}\_0)\$는 작동점을 표시하고, \$J\$는 Stewart 플랫폼의 자코비언을 의미하며, \$z\_0\$는 다리가 늘어나지도 줄어들지도 않은 상태에서 두 좌표계 원점 사이의 높이이다.

6개의 다리에 작용된 힘 \$\mathbf{f} = (f\_1, \dots, f\_6)^T\$로부터 상부 조인트 원의 중심에 작용하는 외력(힘과 토크)은 다음과 같이 구해진다. 외력에 의해 각 다리에 힘이 가해지면 다리에 작용된 힘의 크기를 A/D보드를 통해 전압으로 얻게 되고, 스프링 상수 \$k\$로부터 다리의 길이변화량 \$l\_i - l\_0\$

를 알 수 있다. 식 (2)를 이용하면 순기구학의 해인 상부 조인트 원 중심의 위치와 방향에 관한 정보를 얻을 수 있다. 이 값을 이용하여 회전과 병진이 일어난 뒤의 상부 조인트 좌표 \$B\_i\$를 좌표계 {A}에 관해 계산한다. 좌표계 {A}에 대해 표현된 좌표 \$B\_i\$와 \$A\_i\$로부터 다리에 작용된 힘벡터의 크기 및 방향을 알 수 있다. 결국 상판에 작용된 힘성분은 정적평형으로부터 각각의 다리에 작용된 힘들의 \$x\_A, y\_A, z\_A\$ 성분의 합으로 표현된다. 상판에 작용하는 토크는 중심으로부터 각 조인트까지의 거리에 조인트에 작용하는 힘을 곱한 것을 더하면 얻어진다. Fig. 2는 이 과정을 보여주는 순서도이다.

### 3. Stewart 플랫폼방식의 6축 힘-토크 센서의 설계 및 제작

Stewart 플랫폼 구조의 힘-토크 센서는 Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 상판(upper plate)과 하판(lower plate), 그리고 이들을 연결하는 6개의 다리(legs)들로 구성되어 있다. 이러한 힘-토크 센서의 기구학적 설계는 상판과 하판의 반경, 다리의 길이, 조인트 간격 등을 결정하는 것이다. 각 설계파라미터들의 변화에 따른 힘-토크의 전달특성은 상호 의존관계에 있기 때문에 최적의 설계값을 구하기 위한 연구가 수행되어 왔다. Stewart 플랫폼의 기구학적 최적설계를 위하여 여러 가지 성능지수가 사용될 수 있다<sup>(1)</sup>. 허금강 등<sup>(1)</sup>은 자코비안 행렬 \$J\$의 상태수(condition number)를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 그러나 힘과 토크는 다른 차원을 가지고 있기 때문에 힘과 토크를 따로 고려하여 해석하는 것이 바람직하다<sup>(5)</sup>. Kosuge 등<sup>(5)</sup>은 Stewart 플랫폼에 대하여, 각 방향의 힘과 각 방향의 토크의 최대값에 대한 등방성을 해석하였다. 안병준<sup>(13)</sup>등은 힘-모멘트 조작성 타원체의 체적을 정량화하는 방정식을 제시하고 그것을 성능지수로 하여 설계변수를 결정할 수 있음을 보였다.

본 논문에서 제작한 힘-토크센서는 Kosuge 등<sup>(5)</sup>이 제안한 해석 방법을 이용하여, 기구학적 설계파라미터에 따른 힘-토크 전달특성이 등방성을 가지도록 설계되었다. 제작상의 문제를 고려하여, 본 논문에서 사용되는 Stewart 플랫폼의 상판과 하판의 짧은 쪽 판결간격 (\$A\_1A\_2, B\_1B\_6\$ 등) \$d\$는 조인트 설치에 필요한 최소한의 거리로써 모두 동일한 값으로 제한하고, \$A\_1, A\_3, A\_5\$와 \$B\_1, B\_3, B\_5\$를 각각 \$120^\circ\$간격으로 배치하였다. 설계에 관한 상세한 내용은 참고문헌 [12]를 참조하기로 하고, 본 논문에서는 그 설계된 결과만을 실는다.

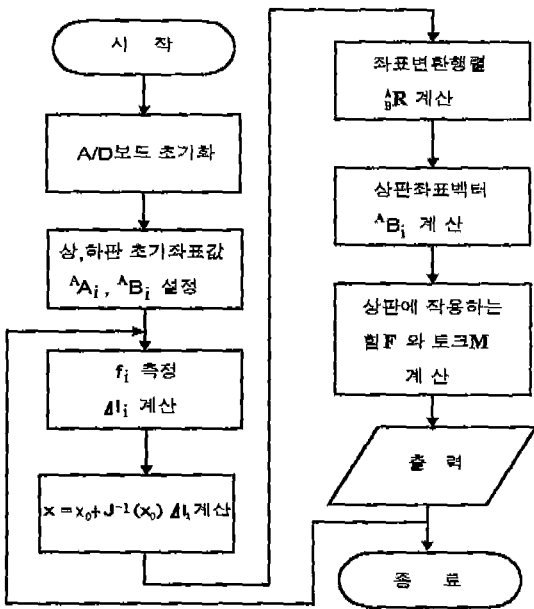


Fig. 2 The order for computing the force F and torque M acting on the upper plate from the forces acting on the six legs.

$$\begin{aligned}
 r_A &= 134mm \\
 r_B &= 90mm \\
 l_i &= 133.5mm \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \\
 d &= 30mm
 \end{aligned}$$

여기서  $r_A$ 는 하판의 반경,  $r_B$ 는 상판의 반경이다. Stewart 플랫폼의 구조로부터 발생하는 특이점(singularity)을 피하기 위하여, 상판과 하판의 모양은 정육각형이 안되도록 설계해야 하며, 상판과 하판을 연결하는 다리는 상판 육각형의 긴 변과 하판 육각형의 짧은 변이 서로 대응하도록 설치해야 한다.<sup>(8)</sup>

다리에 해당하는 6개의 1자유도 힘변환기는 5kg까지의 인장 및 압축력을 측정할 수 있으며, 1kg당 1VDC의 전압을 출력한다. 센서의 영점조정에는 힘변환기의 중앙부에 설치된 조정링을 사용한다. 센서의 내부는 인장, 압축을 견디는 두개의 스프링과 LVDT, 코어등으로 구성되어 있다. 1자유도 힘변환기는 0.57mm의 선형작동범위를 가지고 있다. 6개의 다리와 상,하판은 3자유도를 갖는 볼소켓조인트와 조인트 어댑터를 사용하여 연결되어 있다. 상, 하판 및 조인트 어댑터는 힘-토크 센서의 무게를 줄이기 위하여 Al7075, Al2024를 사용하였다.

제작된 힘-토크 센서의 사진은 Fig. 3과 같다. 센서의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 만들었다. Fig. 4는 세 축방향의 힘과 세 축 방향의 토크를 측정할 수 있는 전체 실험 장치의 구성도이다. 6축 힘-토크 센서는 외력으로 작용하는 힘-토크를 측정하는 것이므로, 센서 자중에 의한 영향을 제거할 수 있어야 한다.

#### 4. 실험결과

제작된 6축 힘-토크 센서의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 힘-토크 센서의 다리에 내장된 LVDT신호가 포화(saturation)상태에 이를 때까지 각 축 방향으로 힘을 증가시키면서 측정 가능한 힘과 토크의 범위를 구하였다. 토크의 경우 우력(couple)을 가하여 순수한 토크 만이 측정되도록 하였다. 우력을 발생시키기 위하여 센서를 수직으로 세운 다음 동일한 크기의 추를 양 옆에 작용시키되, 한 쪽은 위쪽에 설치된 도르레를 거치도록 하여 힘의 방향을 위쪽이 되도록 하였다. 상부 조인트 원의 중심을 토크 중심으로 하였다. Fig. 5와 같은 측정 결과, 힘의 경우는 0.48%, 토크의 경우는

0.41% 이내의 선형성(linearity)을 보였고, 정확도는 힘의 경우는 3.5% 이내, 토크의 경우는 7.5% 이내로 나타났다. Fig. 5는  $x$  방향에서의 측정결과를 보여주고 있으며, 다른 방향에 대해서도 유사한 형상을 보여주고 있으나 지면관계상 생략한다. Table 1은 힘과 토크의 측정가능범위를 나타낸다.

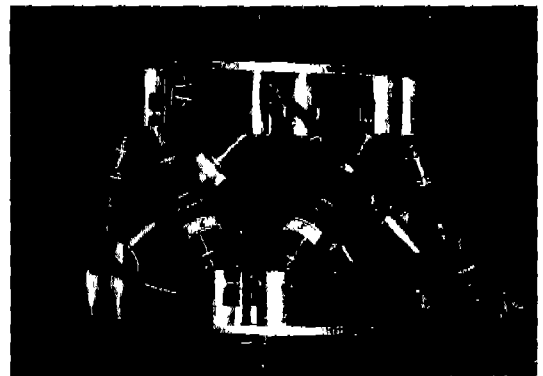


Fig. 3 The photograph of the force-torque sensor

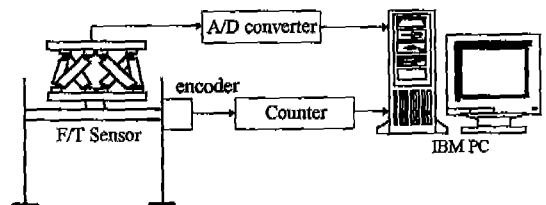
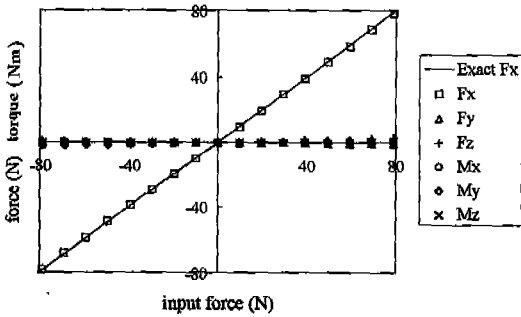


Fig. 4 The schematic diagram of a experiment system

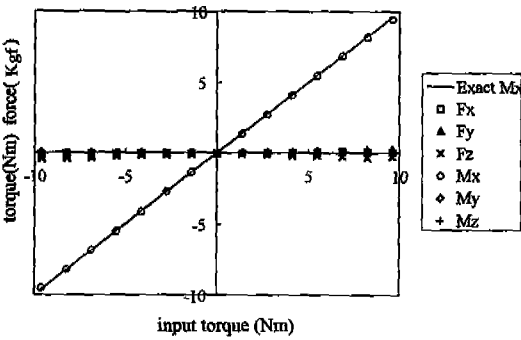
Table 1. The range of force and torque measurements

$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (Nm)	$M_y$ (Nm)	$M_z$ (Nm)
78	80	185	9.5	8.9	13
-78	-80	-180	-9.5	-8.9	-13

센서 자중의 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 제작된 실험장치위에 놓여진 센서를 수평면상에서 시계방향으로 회전시키는 것을 yaw, 센서전체를 엔코더 축 주위로 360°회전시키는 것을 pitch라 정의하고, yaw각도는 45°, pitch는 6°간격으로 회전시키면



(a) Measurement of  $F_x$



(b) Measurement of  $M_x$

Fig. 5 The results of force and torque measurements

서 각각의 위치와 방향에 따라 자중에 의해 발생하는 힘과 토크를 측정하여 순람표(look-up table)를 만들었다. 측정결과 센서의 자중에 의한 힘과 토크가 회전축과 회전 방향에 따라 규칙성을 가지고 나타남을 알 수 있었다. Fig. 6은 그 중 한 예를 보인 것이다.

Fig. 6과 같이 센서의 위치 및 방향에 따라 발생하는 자중에 의한 영향은 중력보상을 통하여 자중을 제외한 순수한 외력만을 측정해 낼 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6으로부터 만들어진 순람표를 이용함으로써 pitch의 변화에 따른 상판의 자중에 의한 영향을 선형보간을 통하여 보상해 주고 있음을 보여준다. 일례로 40N의 추를 센서의 상판에 부착하고 이를 회전시키면서 힘과 토크를 측정한 결과, 힘의 경우 2.6%, 토크의 경우 0.54% 이내의 오차를 가지고 측정되었다. 결국 중력에 의한 영향을 보상하며 입력 힘과 토크를 측정할 수 있었다.

기존의 상용화된 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 힘-토크 센서에 흔히 존재하는 힘과 토크간의 간섭

(coupling)영향이 제작된 6축 힘-토크센서에도 존재하는지를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 힘  $F_y$  와 토크  $M_x, M_z$ 를 동시에 가해주면서 이 힘과 토크에 의한  $F_x, F_z, M_y$ 로의 영향을 조사하였다. 측정결과  $F_y$ 에 의한  $F_x$ 로의 간섭(couple)영향은 3.01%,  $F_y$ 에 의한  $F_z$ 로의 영향은 2.01%이내로 존재하였다. 모멘트의 경우  $M_x$ 에 의한  $M_y$ 로의 영향은 4.01%이내로 존재하였다.

상용화된 스트레인 게이지 방식의 힘-토크 센서들과 제작된 Stewart 플랫폼방식의 힘-토크센서의 사양(specification)을 비교한 결과 측정범위, 분해능(resolution), 선형도 등의 측면에서 대등하거나 우수한 성능을 보였다. 그러나 크기와 중량이 다소 큰 문제는 앞으로 경량화, 소형화된 센서를 제작함으로써 해결할 수 있으리라 판단된다.

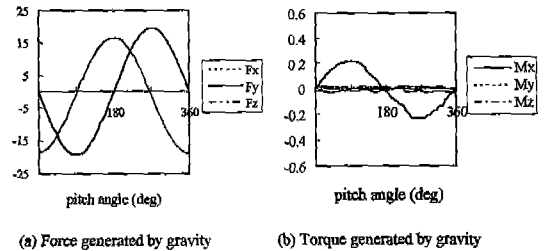


Fig. 6 Force-torque generated by the weight of the upper plate (in case yaw = 0 deg)

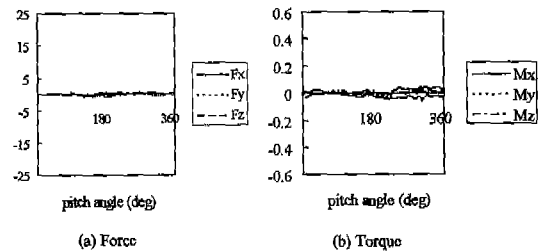


Fig. 7 Gravity compensation by a linear interpolation of the look-up table

## 5. 결론

Stewart 플랫폼 방식의 6축 힘-토크센서를 설계, 제작하고 그 성능을 평가하였다. 힘-토크 센서의 설계는 측정하려고 하는 힘과 토크의 등방성을 성능지수로 두고 수행

하였고, 순기구학의 해는 역기구학식의 선형화를 통해 해결하였다. 제작된 센서의 성능을 평가하고 그 실현성을 검토한 결과 정확도는 힘의 경우 최대오차가 3.5%이내, 토크의 경우 7.5%이내 이고, 선형도는 힘의 경우 0.48%이내, 토크의 경우 0.41%이내로 나타났다. 센서의 자중에 의한 힘과 토크의 영향은 미리 실험을 통해 구해진 순람표의 선형보간을 통해 적절히 보상함으로써 순수한 의력만을 측정해 낼 수 있음을 보였다.

### 참 고 문 헌

1. 허금강, 김희국, 조황, 이병주, "스튜어트 플랫폼 구조를 활용한 손목 부착형 6-자유도 Force/Torque 센서의 최적설계," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 668-673, 1994.
2. Gaillet, A. and Reboulet, C., "A Isostatic Six Component Force and Torque Sensor," Proc. 13th Int. Symposium on Industrial Robots, pp. 102-111, 1983.
3. Kerr, D. R., "Analysis, Properties, and Design of Stewart-Platform Transducer," J. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 111, pp. 25-28, 1989.
4. Nguyen, C. C., Antrazi, S. S., Zhou, Z. L. and Campbell Jr., C. E., "Analysis Experimentation of a Stewart Platform-Based Force/Torque Sensor," Int. J. Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 133-140, 1992.
5. Kosuge, K., Okuda, M., Kawamata, H. and Fukuda, T., "Input/Output Force Analysis of Parallel Link Manipulators," IEEE J. Robotics and Automation, pp. 714-719, 1993.
6. Stewart, D., "A Platform with Six Degree of Freedom," Proc. Institute of Mechanical Engineering, 180(5), pp. 371-386, 1965.
7. Yang, D. C. H. and Lee, T. W., "Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint," J. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 106, pp. 191-198, 1984.
8. Ma, O. and Angeles, J., "Architecture Singularities of Platform Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1542-1547, 1991.
9. Nanua, P., Waldron, K. J. and Murthy, V., "Direct Kinematic Solution of Stewart Platform," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 4, pp. 438-443, 1990.
10. 변용규, 조형석, 김동윤, "6자유도 위치/자세 및 힘/모멘트 측정장치가 일체화된 스튜어트-플랫폼 구조의 로봇손목기구에 관한 연구", 94'한국자동제어 학술회의 논문집(I), pp. 457-462, 1994.
11. 허훈, 장완식, 김재명, "Robot End Effector용 Force-Torque센서 개발에 관한 연구", 94'한국자동제어 학술회의 논문집(II), pp. 1149-1154, 1994.
12. 강철구, 한정훈, "선형화를 이용한 Stewart플랫폼 형태의 힘/토크 센서 설계", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), pp. 649-654, 1995.
13. 안병준, 홍금식, "병렬형 매니퓰레이터의 힘/모우멘트 전달특성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 4, pp.109-121, 1996.
14. 한정훈, 강철구, "Stewart플랫폼을 이용한 손목 힘/토크 센서의 해석", 건국대학교 학술지, Vol. 40, No. 2, pp.201-206, 1996.
15. 강철구, 한정훈, "Stewart 플랫폼 형식의 6축 힘/토크 센서에 대한 실험적 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 393-397, 1996.