

## 조건수를 이용한 6자유도 F/T센서의 최적구조에 관한 연구

### A Study on the optimal structure of 6 D.O.F F/T Sensor using the condition number

장 완식\*·김재명\*\*<sup>1)</sup>

Wan-Shik Jang · Jae-Myung Kim

(1996년 4월 6일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

#### ABSTRACT

In controlling manipulators interacting with the external environment, an important role is played by the Force/Torque(F/T) sensors. Recently, a number of structures for F/T sensors have been proposed, and some criteria for their evaluation have been introduced.

This paper presents a systematic analysis of F/T sensor at the design stage. A model of the F/T sensors, based on Stewart Platform structure, is developed on the basis of static and kinematic equation. The condition number defined by the kinematic velocity and force analysis of F/T sensor is used as a performance index. Thus, 4 optimal structure factors of 6 D.O.F. F/T sensor are determined by using the condition number.

#### 1. 서 론

로봇을 이용한 조립공정의 자동화에 있어서 불완전하거나 불균일한 부품, 부정확한 조립 판의 위치 및 삽입 축과의 각도오차, 또는 로봇제어 시스템의 위치오차 등으로 인하여 부품의 조립이 로봇으로부터의 잘못된 방향으로 가해진 힘이나 모멘트 때문에 성공적으로 이루어지지 않게 되는 강제끼워맞춤(jamming) 현상이나 조립부품이 기판

구멍 내에서 두 점이 접촉을 갖는 상황에서 탄성변형을 수반하여 꽉 끼게 되는 쇄기박음(wedging) 현상이 자주 발생하게 된다. 이 때문에 부품에 작용되는 큰 반력이나 모멘트의 발생으로 인한 부품 파손과 작업시간의 지연 등으로 자동화 생산 공정에 때때로 치명적인 생산성의 저하를 초래한다.

특히 외부 물체와의 상호 작용력이 크게 발생하는 작업의 경우에는 이론적으로 고정밀도·고강도 로봇의 활용이 요구되지만 이 같은 로봇은 실제 기

\* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품공장자동화연구센터)

\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

계 가공시 야기되는 가공오차, 큰 상호 반발력에 따른 로봇 링크 자체의 구조 변형 등에 의한 불확실성 때문에 실제적인 활용은 어렵다.

로봇을 이용하는 자동화 조립공정 등에서 자주 발생하는 이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로 조립 반력 및 모멘트의 측정을 위한 F/T(Force/Torque) 센서를 활용하는 제어방법의 개발<sup>1)</sup>, 조립공정에서 사용되는 로봇 시스템과 로봇 손목(hand gripper)등의 콤플라이언스(compliance)의 측정을 위한 모델개발<sup>2)</sup> 및 이를 활용하는 제어 알고리즘 개발<sup>3)</sup>, 또는 조립 로봇 시스템의 손목에 부착되는 콤플라이언스기기<sup>4)</sup> 등의 개발에 관한 연구가 대두되고 있다. 이를 위해서 많은 선진국에서는 F/T센서를 설계 제작하여 실제 산업현장에 사용하고 있으나, 현재 우리나라 설정은 전혀 이에 대한 연구가 이루어지지 않고 있으며 필요에 따라 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

최근에 병렬구조와 비교하여 높은 구조적 강성과 고정밀도의 동작 그리고 가반중량에 대한 자체 중량비가 커서 수많은 로봇의 응용에 고려되고 있는 병렬구조의 기구중 대표적으로 응용되고 있는 스트워트 플랫폼 형태를 이용한 6-자유도 F/T센서가 제작되었는데, 이것은 상판(top plate)과 하판(base plate)을 연결하는 6개 링크의 각각에 스프링을 내포시키고 외력이 가해졌을 때 발생하는 이 스프링들의 변위를 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측정한 후 스프링 강성을 이용하여 가해진 힘과 토크를 구하는 방식을 사용하고 있다<sup>5)</sup>. 본논문은 스트워트 플랫폼 형태의 F/T센서에서 기존의 방법과 다르게 각 링크 내부에 스프링을 내포시키는 대신에 6개 각주 막대의 축방향 기계적성질을 이용한 F/T센서의 최적구조를 설계·제작하는데 필요한 인자를 결정하는 알고리즘을 개발하여 이에 대한 이론적인 배경을 제시하고자 한다.

## 2. F/T센서의 구조 및 해석

### 2.1 F/T센서구조

본 연구에서 제안된 6 자유도 F/T센서는 3개의 힘( $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$ )과 3개의 토크( $\tau_x$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_z$ )가 6개의 미끄럼 관절 대신에 각주 막대의 축 방향으로만 콤플라이언스 특성을 갖는 기계적 구조를 이용하고 있다. Fig. 1은 본 논문에서 이용하고자 하는 병렬구조를 갖는 스트워트 플랫폼 형태인 F/T센서의 전체적인 형상이다. 이 그림에서와 같이 F/T센서의 전체적인 형상은 상판과 하판, 그리고 스트워트 플랫폼의 기구와 유사하게 기하학적으로 배열 되어있는 6개의 각주 막대(prismatic bar)로 구성되어 있다.

이러한 형태의 F/T센서는 각주 막대와 하판을 연결시키기 위해 변형된 유니버설 조인트(universal joint), 각주 막대와 하판 사이에는 3-자유도 볼소켓 조인트(ball-socket joint)를 사용하고 있다.

이와 같은 형태의 6자유도 F/T센서 매카니즘의 최적인자를 결정하여 향후 설계자에게 설계 및 제작을 위한 기본적인 표준(criteria)을 제시하고자 한다.

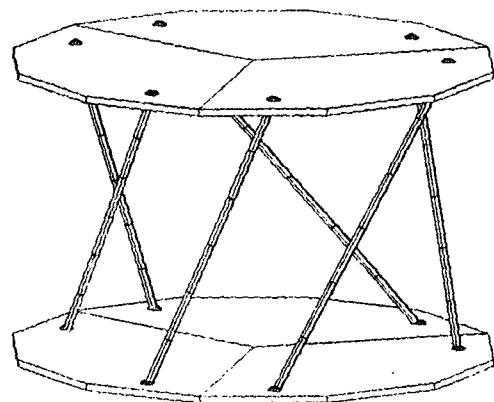


Fig. 1 The proposed structure of the F/T sensor

### 2.2 F/T센서 해석

F/T센서의 해석을 위하여 필요한 기구학적 매개변수들은 Fig. 2에서와 같이 하판의 중심에 하판 좌표계( $x_b$ ,  $y_b$ ,  $z_b$ )를 설정하고, 여섯 개의 각주 막대들과 교차하는 지점에 위치벡터를  $\vec{R}_{bi}$ 라고 정의한다. 마찬가지로 상판의 중심에 상판 좌표계( $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ )를 설정하고 여섯 개의 각주 막대들과 상판이 교차하는 지점까지의 위치벡터를 각각  $\vec{r}_i$ 라고 정의한다. 또한 하판 좌표계의 원점으로부터 상판 좌표계의 원점까지의 위치벡터를  $\vec{R}$ , 하판 좌표계로부터 상판 좌표계로의 회전 변환행렬

(rotation transformation matrix)을  $[{}^B_T R]$ 로 정의한다.

이 회전 변환행렬은 하판에 대해 다음 순서의 회전에 따라 얻어지며, 오일러 각( $\alpha, \beta, \gamma$ )을 이용한다. 즉, x축에 대해 각도  $\gamma$  만큼의 상판 좌표계의 회전(요우), y축에 대해 각도  $\beta$  만큼의 상판 좌표계의 회전(피치), z축에 대해 각도  $\alpha$  만큼의 회전(롤)로 정의한다.

위와 같이 룰-피치-요우 각도에 의한 회전 변환 행렬은

$$[{}^B_T R] = \text{Rot}(z, \alpha) \cdot \text{Rot}(y, \beta) \cdot \text{Rot}(x, \gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (1)$$

이며, 여기서  $c=\cos$ ,  $s=\sin$ 을 나타낸다. 일반적인 F/T센서의 구조와 같이 z축을 중심으로 대칭인 구조를 갖도록 하기 위하여 각주 막대들과 상판, 그리고 하판과의 교차점의 위치는 Fig. 2와 같이  $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 의 등간격으로 나눈 후 그 등간격 선에 대칭이 되도록 배치하였다.

각주 막대들과 상판 그리고 하판과의 교차점의 위치벡터를 각각의 좌표계로 표현하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

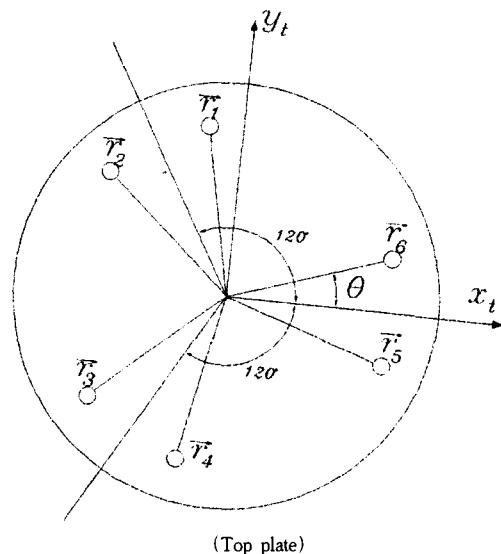
하판의 경우,

$$\begin{aligned} \vec{R}_{b1} &= \begin{bmatrix} R\cos(\theta) \\ R\sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{R}_{b2} &= \begin{bmatrix} R\cos(120-\theta) \\ R\sin(120-\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \vec{R}_{b3} &= \begin{bmatrix} R\cos(120+\theta) \\ R\sin(120+\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{R}_{b4} &= \begin{bmatrix} R\cos(240-\theta) \\ R\sin(240-\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \vec{R}_{b5} &= \begin{bmatrix} R\cos(240+\theta) \\ R\sin(240+\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{R}_{b6} &= \begin{bmatrix} R\cos(-\theta) \\ R\sin(-\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots (2) \end{aligned}$$

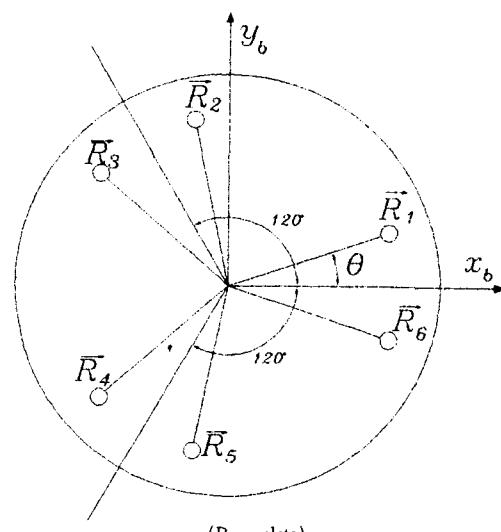
상판의 경우,

$$\begin{aligned} \vec{r}_{t1} &= \begin{bmatrix} r\cos(120-\theta) \\ r\sin(120-\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{r}_{t2} &= \begin{bmatrix} r\cos(120+\theta) \\ r\sin(120+\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \vec{r}_{t3} &= \begin{bmatrix} r\cos(240-\theta) \\ r\sin(240-\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{r}_{t4} &= \begin{bmatrix} r\cos(240+\theta) \\ r\sin(240+\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \vec{r}_{t5} &= \begin{bmatrix} r\cos(-\theta) \\ r\sin(-\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, & \vec{r}_{t6} &= \begin{bmatrix} r\cos(\theta) \\ r\sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots (3) \end{aligned}$$

그러므로 제안하고자 하는 스트워트 플랫폼 메카니즘을 이용한 F/T센서 구조 해석을 위해서 반경비( $r/R$ ), 관절의 위치각을 나타내는 오프셋 각( $\theta$ ), Z축에 대한 변위( $R_z$ ), 그리고 Z축에 대한 회전변위( $\alpha$ ) 등이 설계변수로 설정되었다.



(Top plate)



(Base plate)

Fig. 2 The coordinate of F/T sensor in top &amp; base plate

### 2.2.1 F/T센서 정기구학 해석

F/T센서의 정기구학적 해석은 하판의 원점에서 상판의 원점까지의 위치벡터  $\vec{R}_t = (x, y, z)^T$ 와 회

전변환행렬  $[{}^B_R]$ 이 주어졌을 때 각주 막대들의 변수(변위)  $l_i$ 를 구하는 것을 말한다.

각주 막대의 변위벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{l}_i = \vec{R}_t + \vec{r}_i - \vec{R}_{bi} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

여기서,  $\vec{R}_t = (x, y, z)^T$

$$\vec{r}_i = [{}^B_R] \cdot \vec{r}_{ti}$$

$$\|\vec{l}_i\| = l_i$$

또한  $\vec{R}_{bi}$ ,  $\vec{r}_6$ 은 고정설계인자(상판과 하판의 원점에서 교차점까지의 반경)이다.

식(4)의 양변에 노름(norm)의 꼽을 구하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\vec{l}_i \cdot \vec{l}_i = (\vec{R}_t + \vec{r}_i - \vec{R}_{bi}) \cdot (\vec{R}_t + \vec{r}_i - \vec{R}_{bi}) = l_i^2 \quad (5)$$

위 식으로부터 주어진 상판의 위치벡터  $\vec{R}_t$ 와 방위  $[{}^B_R]$ 에 대한 각주 막대의 변위  $l_i$ 는 식(6)과 같이 나타낸다.

$$l_i = \sqrt{\vec{l}_i \cdot \vec{l}_i} = \sqrt{(\vec{R}_t + \vec{r}_i - \vec{R}_{bi}) \cdot (\vec{R}_t + \vec{r}_i - \vec{R}_{bi})} \quad (6)$$

## 2.2.2 F/T센서의 역기구학 해석

역기구학은 각주 막대의 길이  $l_i$ 의 값들이 주어졌을 때 상판의 위치벡터  $R_t$ 와 방위  $[{}^B_R]$ 를 구하는 것이다.

역기구학 문제를 풀기 위해 수치적 반복법인 N-R(Newton-Rapson method) 반복법을 사용하였으며 N-R법의 적용에 대한 알고리즘을 단계적으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \\ \alpha_{k+1} \\ \beta_{k+1} \\ \gamma_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ \alpha_k \\ \beta_k \\ \gamma_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \dots & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \beta} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x} & \frac{\partial f_6}{\partial y} & \frac{\partial f_6}{\partial z} & \frac{\partial f_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial f_6}{\partial \beta} & \frac{\partial f_6}{\partial \gamma} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \\ f_4(x_k) \\ f_5(x_k) \\ f_6(x_k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

단계 4)  $\sum_{i=1}^6 |x_{k+1} - x_k| < \epsilon$  (허용오차)를 만족하면  $x_{k+1}$ 이 원하는 해이며, 만족하지 않는다면 단계 2)~단계 4)를 반복한다.

## 2.2.3 F/T센서의 속도해석

상판에서의 속도는 상판의 절대 선형속도 변수  $\vec{R}_t$ 와 각속도 변수  $\vec{w}$ 를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} u &= [\vec{R}_t \vec{w}]^T \\ &= [xyz w_x w_y w_z]^T \end{aligned} \quad (11)$$

단계 1)  $\vec{R}_t$ 와  $[{}^B_R]$ 에 포함되어 있는 인자의 초기치( $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ )를 설정한다.

단계 2) N-R을 적용하기 위한 함수  $f_i$ 를 유도한다.

$$f_i = (\vec{R}_t - \vec{R}_{bi} + [{}^B_R] \cdot \vec{r}_{ti}) \cdot (\vec{R}_t - \vec{R}_{bi} + [{}^B_R] \cdot \vec{r}_{ti}) - l_i^2 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \vec{r}_{ti} = [{}^B_R] \cdot \vec{r}_{ti}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \\ r_{iz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11}r_{ix} + r_{12}r_{iy} + r_{13}r_{iz} \\ r_{21}r_{ix} + r_{22}r_{iy} + r_{23}r_{iz} \\ r_{31}r_{ix} + r_{32}r_{iy} + r_{33}r_{iz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$r_{iz}=0$ ,  $r_{iz}=0$ 인 것을 이용하여 식(8)을 (7)에 대입하면,

$$\begin{aligned} f_i &= (R_{ix} - R_{ix} + r_{11}r_{ix} + r_{12}r_{iy})^2 \\ &\quad + (R_{iy} - R_{iy} + r_{21}r_{iy} + r_{22}r_{iy})^2 \\ &\quad + (R_{iz} + r_{31}r_{ix} + r_{32}r_{iy})^2 - l_i^2 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

단계 3) 주어진 함수  $f_i$ 에 N-R 방법을 적용한다.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \vec{f}(\vec{x}_k)$$

혹은,

$$\begin{aligned} &\text{여기서,} \\ &\vec{w} = [w_x, w_y, w_z], \\ &\vec{R}_t = [\vec{R}_{tx}, \vec{R}_{ty}, \vec{R}_{tz}] \\ &\text{식(5)를 시간에 대하여 미분하고, } \vec{r}_i \times \vec{r}_i = 0 \text{ 와 } \vec{r}_i = \vec{w} \times \vec{r}_i \text{ 임을 이용하여 행렬형태로 나타내면,} \\ &[\vec{L}] \vec{f} = [\vec{A}] \vec{u} \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다.

여기서,

$$[L] = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_6 \end{bmatrix}, \quad \vec{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \\ l_6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \vec{l}_1 & \vec{l}_1 \times \vec{l}_1 \\ \vec{l}_2 & \vec{l}_2 \times \vec{l}_2 \\ \vec{l}_3 & \vec{l}_3 \times \vec{l}_3 \\ \vec{l}_4 & \vec{l}_4 \times \vec{l}_4 \\ \vec{l}_5 & \vec{l}_5 \times \vec{l}_5 \\ \vec{l}_6 & \vec{l}_6 \times \vec{l}_6 \end{bmatrix}, \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} \vec{R}_t \\ \vec{w} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(12)는  $\vec{l}$ 에 대해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{l} = [L]^{-1}[A]\vec{u} = [J]^{-1}\vec{u} \quad (15)$$

여기서,  $[J]^{-1} = [L]^{-1}[A]$ 는 자코비안(jacobian)의 역행렬을 나타낸다.

## 2.2.4 상판에 가해진 힘 해석

식(15)에서 사용된 변위변수  $\vec{l}$ 와  $\vec{u}$ 에 가상 일의 원리를 이용하면,

$$\vec{P}^T \delta \vec{l} = \vec{f}^T \delta \vec{u} \quad (16)$$

여기서,  $\vec{P}$ 는 축방향의 힘,  $\delta \vec{l}$ 는 축방향의 가상 변위,  $\vec{f}$ 는 상판중앙에 작용하는 힘,  $\delta \vec{u}$ 는 상판중앙의 가상변위이며, 이러한 벡터들은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{P} = (p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6)^T, \\ \delta \vec{l} = (\delta l_1 \ \delta l_2 \ \delta l_3 \ \delta l_4 \ \delta l_5 \ \delta l_6)^T$$

$$\vec{f} = (f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z),$$

$$\delta \vec{u} = (\delta x \ \delta y \ \delta z \ \theta x \ \theta y \ \theta z)^T$$

식(15)을 가상변위 형태로 나타내면,

$$\delta \vec{l} = [J]^{-1} \delta \vec{u} = [L]^{-1}[A] \delta \vec{u} \quad (17)$$

식(17)를 식(16)에 대입하면,

$$\vec{f} = [A]^T [L]^{-T} \vec{P} = [J]^{-T} \vec{P} \quad (18)$$

F/T센서 각각의 각주 막대의 강성( $K_i$ )과 스트레인 계이지에서 측정된 실제변위를 있다고 가정하면 축 방향 힘( $\vec{P}$ )은 다음과 같이 나타내진다.

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta l_1 \\ \delta l_2 \\ \delta l_3 \\ \delta l_4 \\ \delta l_5 \\ \delta l_6 \end{bmatrix} = [K] = \delta \vec{l} \quad (19)$$

식(19)를 식(18)에 대입하면, F/T센서 상판에 가해진 외력은 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{f} = [f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z] \\ = [A^T] [L]^{-T} [K] [\delta l_1 \ \delta l_2 \ \delta l_3 \ \delta l_4 \ \delta l_5 \ \delta l_6]^T \\ \dots \dots \dots \quad (20)$$

## 3. F/T 센서 구조의 기하학적 특성해석

### 3.1 속도 및 힘에 의한 구조해석

식(15)로부터 행렬  $[A]$ 가 특이하지 않다면  $\vec{u}$ 와  $\vec{l}$  사이의 일차 미분 관계식은

$$\dot{\vec{u}} = [A^{-1}] [\vec{l}] \quad (21)$$

이다. 여기서 일차 운동학적 영향계수 행렬인 자코비안 행렬  $[G_l]$ 는 단지 변위를 나타내는 변수들로서만 표현되므로, F/T센서의 임의의 위치에서 기하학적 특징은 그 위치에서 자코비안 행렬을 분석하므로써 조사될 수 있다. 이에 대한 관계식을 알아보기 위하여 속도변수  $\dot{\vec{u}}$ 에 대한 노음(Norm)을 취하고 링크속도 변수  $\dot{\vec{l}}$ 의 노음인  $\|\dot{\vec{l}}\|$ 로 나누면,

$$\frac{\dot{\vec{u}}^T \dot{\vec{u}}}{\|\dot{\vec{l}}\|^2} = \frac{\dot{\vec{l}}^T [G_l]^T [G_l] \dot{\vec{l}}}{\|\dot{\vec{l}}\|^2} \quad (22)$$

행렬  $[G_l]^T [G_l]$ 은 정수 대칭행렬이므로 이들의 고유치는 항상 정수이며,

$$\lambda_{\min}^2 \leq \lambda_1^2 \leq \lambda_2^2 \leq \lambda_{\max}^2$$

이라 하자. Rayleigh의 원리를 적용하면,

$$\lambda_{\min}^2 \leq \frac{\dot{\vec{l}}^T [G_l]^T [G_l] \dot{\vec{l}}}{\|\dot{\vec{l}}\|^2} \leq \lambda_{\max}^2 \quad (23)$$

식(22)를 식(23)에 대입하면,

$$\lambda_{\min}^2 \|\dot{\vec{l}}\|^2 \leq \|\dot{\vec{u}}\|^2 \leq \lambda_{\max}^2 \|\dot{\vec{l}}\|^2 \quad (24)$$

여기서,

$$\|\dot{\vec{u}}\|^2 = \dot{\vec{u}}^T \dot{\vec{u}}, \quad \|\dot{\vec{l}}\|^2 = \dot{\vec{l}}^T \dot{\vec{l}}$$

위 식에서 보여준 것과 같이 고유치들은 입출력 사이의 전달특성과 직접 관계 있음을 알 수 있다.

또한, 식(18)로부터,  $\vec{P}$ 에 대해 관계식을 유도하면,

$$\vec{P} = [J]^{T} \vec{f} \quad (25)$$

이다. 위에서 적용된 똑같은 방법을 식(25)에 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{\|\vec{P}\|^2}{\lambda_{\max}^2} \leq \|\vec{f}\|^2 \leq \frac{\|\vec{P}\|^2}{\lambda_{\min}^2} \quad (26)$$

이다. 여기서,

$$\|\vec{f}\|^2 = \vec{f}^T \vec{f}, \quad \|\vec{P}\|^2 = \vec{P}^T \vec{P}$$

식(25)와 식(26)에서 보여준 것과 같이 속도변

수와 험변수들은 서로 이원적인 관계식을 가지고 있음을 알 수 있다. 다시 말해 시스템이 할 수 있는 일의 양은 다른 임의의 변수로 표현되었을 때 변화가 없다는 것이다.

### 3.2 조건수를 이용한 추정

조건수(condition number : C. N.)은 최대 특이  
값과 최소 특이값의 비로

$$C.N. = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \dots \dots \dots \quad (27)$$

와 같이 정의되며, 이 정의에 의해서 조건수는 항상 1보다 크거나 같기 때문에 만일 어떤 시스템의 조건수가 1에 가까운 값을 가지면 시스템은 균일한 전달특성을 갖는다고 말할 수 있으며 큰 조건수 값은 균일하지 않은 전달특성을 의미하는 것이다.

일반적으로 행렬  $[G_i^u]$ 의 특이값은  $[G_i^u][G_i^u]^T$ 나  $[G_i^u]^T[G_i^u]$ 의 고유값의 제곱근 값을 나타내며, 이 특이값의 계산이 행렬의 조건에 민감하지 않기 때문에 행렬  $[G_i^u][G_i^u]^T$ 나  $[G_i^u]^T[G_i^u]$ 의 고유값 대신에 이러한  $[G_i^u]$ 의 특이값을 주로 사용한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

#### 4.1 F/T서 최적구조 협상

최적구조 인자를 결정하기 위해서 2.2절에서 언급한 4개의 변수 인자들( $a$ ,  $r/R$ ,  $\theta$ ,  $R_{tz}$ )에 대해  $R=1$ 로 고정하여 최적화를 수행하였다. Fig. 3은 4개의 인자에 대한 최적인자 값을 해석·결정하는 데 사용된 프로그램의 흐름도이다.

#### 4.1.1 최적 r 인자

Fig. 4는  $R_{tz} = 0.38$ ,  $\alpha = -60^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $R = 1$ 일 때  $r$ 의 값의 변화에 따라  $[G_L^u]$ 의 특이값과 조건수를 보여준다. 여기서 점선은 특이값을 나타내며 실선은 조건수를 나타낸다.  $r = 0.96$ 인 위치에서 최소의 조건수 1.484870 값을 갖는 것을 알 수 있다.

#### 4.1.2 최적 $\theta$ 인자

Fig. 5는  $R_{12}=0.38$ ,  $\alpha=-60^\circ$ ,  $R=1$ ,  $r=0.95$ 일 때  $\theta$  값을 변화에 따라 [G<sub>1</sub>]<sub>1</sub>의 특이값 및 조건수의 변화를 나타낸다. 실선은 조건수를 나타내며 점선은 특이값을 나타낸다. 이로부터 조건수가 가장 적은 1.484870인  $\theta=20.4^\circ$ 인 값을 최적인자의 값으로 결정한다.

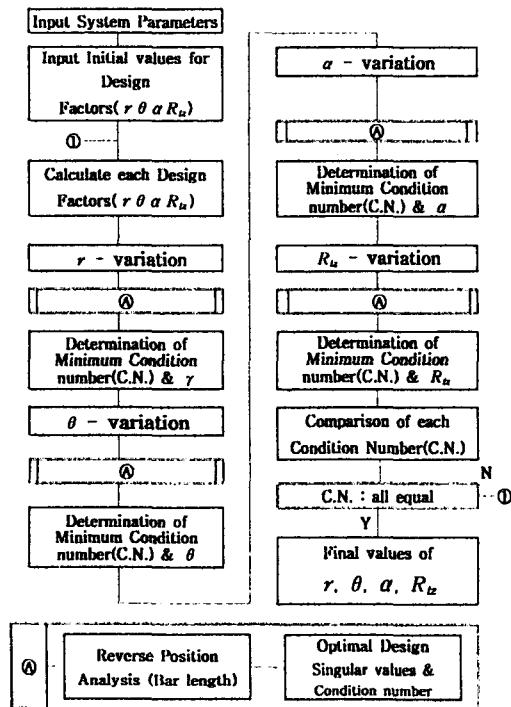


Fig. 3 The flow-chart of the program used for calculating the optimal factor in F/T sensor mechanism

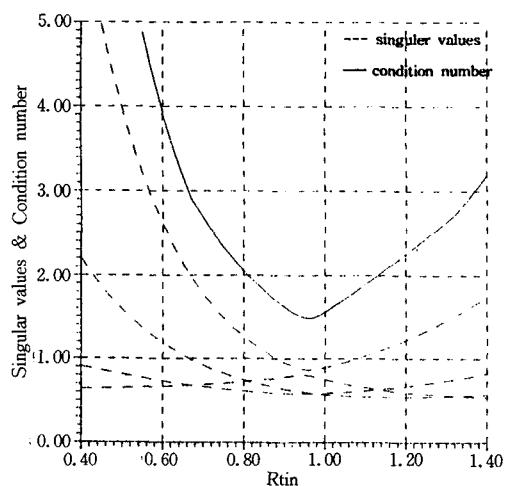
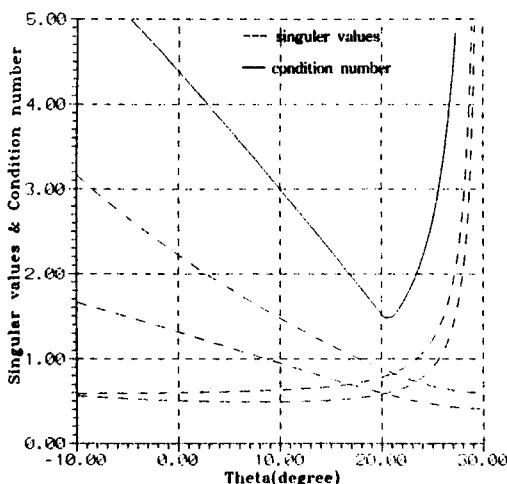


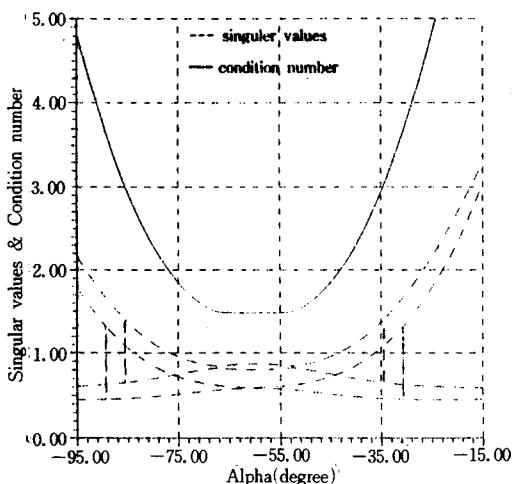
Fig. 4 Optimal factor  $r$  of F/T sensor structure

#### 4.1.3 최적 $\alpha$ 인자

Fig. 6은  $R_{tz}=0.38$ ,  $\theta=18.5^\circ$ ,  $R=1$ ,  $r=0.95$ 일 때 고정하고  $\alpha$ 의 변화에 따라  $[G^*]$ 의 특이값을

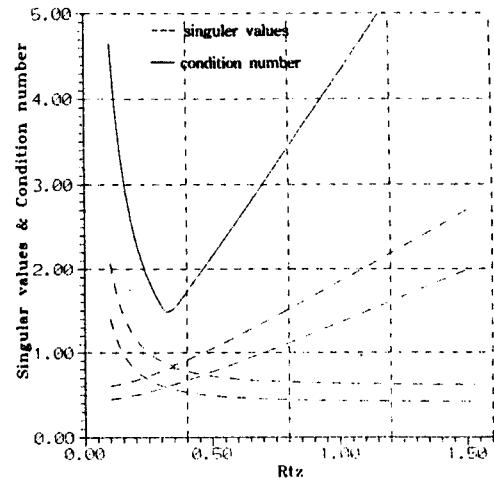
Fig. 5 Optimal factor  $\theta$  of F/T sensor structure

나타낸다. 이 그림으로부터  $\alpha = -60^\circ$ 에서  $\alpha = -50^\circ$  사이에서 가장 작은 조건수인 1.484870을 갖는  $\alpha = -60^\circ$ 를 최적인자의 값으로 결정하였다.

Fig. 6 Optimal factor  $\alpha$  of F/T sensor structure

#### 4.1.4 최적 $R_{tz}$ 인자

Fig. 7은  $\alpha = -60^\circ$ ,  $\theta = 18.5^\circ$ ,  $R = 1$ ,  $r = 0.95$  일 때  $R_{tz}$ 의 값을 변화한 경우이다. 실선은 조건수를 나타내며, 점선은 특이값을 나타낸다. 이 그림으로부터  $R_{tz}$ 의 값이 0.32인 경우에  $[G_1^u]$ 의 특이값이 단위값에 제일 가까운 값인 1.48487를 가지고 있으므로 최적인자로 결정하였다.

Fig. 7 Optimal factor  $R_{tz}$  of F/T sensor structure

F/T센서의 구조설계에 있어서 등방성을 갖도록 하는 것은 중요한 요소인데 본 연구에서 얻어진 최적인자들은 그 조건수들이 단위값에 가깝고 모두가 같은 값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이는 결정된 최적인자들이 등방성의 원칙을 만족하며 F/T센서의 구조설계에 적당한 값이라는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 최적인자에 대한 알고리즘의 타당성 증명

여기서는 2.2.4에서 개발된 상판에 가해진 힘에 대한 알고리즘을 이용하여 3.1절에서 보여준 F/T 센서 최적구조의 인자결정에 대한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 증명하고자 한다. 실제적으로 이 알고리즘은 F/T센서의 설계·제작이 완료된 후, 센서에 힘을 가했을 경우 각주 막대의 변형에 대한 값들이 스트레인 케이지에서 측정되었을 때 계산되어야 한다. 그러나 본 연구는 F/T 센서의 설계·제작에 필요한 최적구조의 인자를 결정하는 것으로서 실제의 실험을 통하지 않고 우리가 직관적으로 가정할 수 있는 조건을 가지고 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

각주 막대는 항상 인장 혹은 압축만을 받기 때문에 모든 각주 막대의 길이의 변형이 같을 경우에는 오직 z축 방향의 힘만이 작용한다고 가정할 수 있다. 이와 같은 경우를 가정하여  $\delta_4$ 값의 변화에 대한 힘 값의 변화를 계산하였다.

Fig. 8은 각주 막대의 길이 변화량  $\delta l_i$ 이 0.001 ~ 0.01까지 변화할 때 3개의 힘과 3개의 토크값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 상판에 가해진 힘을 계산하는 알고리즘은  $\delta l_i$ 의 변화에 대해 오직 z축 방향의 힘( $f_z$ )만이 존재하므로, 이 알고리즘의 타당성을 입증할 수 있다.

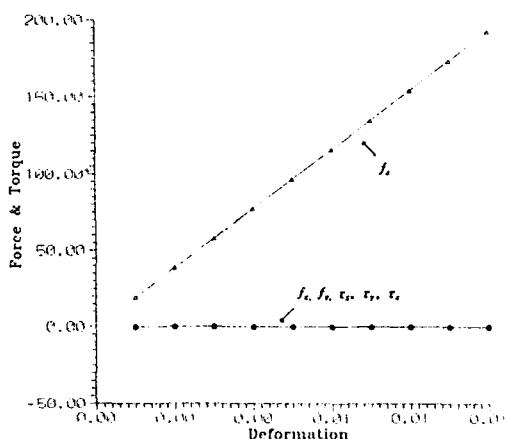


Fig. 8 The variation of forces & torques by  $\delta l_i$   
( $\delta l_i = \text{constant}$ )

## 5. 결 론

본 논문은 스튜위트 플랫폼 구조형태의 F/T센서 최적구조의 인자에 대한 알고리즘을 제시하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결정하였다. 실제 산업현장에서 로봇 시스템이 조립작업에 사용될 때 외부환경과 접촉하게 되므로 이를 제어하기 위해서 F/T센서의 사용은 불가피하다. 이리하여 본 연구는 F/T센서의 초기 설계단계에서 설계자에게 이론적인 배경을 제시하기 위한 필요성에 의해서 시작되었다. 이러한 목적을 위하여 강성이 강한 병렬구조 형태를 갖는 일반화된 모델이 제시되었으며, 이 모델은 상판에 가해진 외력 또는 토크가 상판과 하판을 연결하는 순수 인장 또는 압축 변형만을 갖는 각주막대를 통해서 전달되는 F/T센서의 구조를 활용하였다.

F/T센서의 설계를 위한 최적인자를 결정하기

위해 제시된 센서의 기구학적 해석, 속도 해석, 힘 해석을 통해서 조건수를 정의하였고, 이를 이용하여 최적구조의 인자를 수치해석 프로그램으로 결정하였다.

또한, 제시된 연구결과의 타당성을 입증하기 위하여 센서 상판에 가해진 힘 해석 알고리즘을 사용하여 실제의 실험없이 우리가 직관적으로 가정할 수 있는 조건만을 가지고 증명하였다.

이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 1996년도 연구비의 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) D. E. Whitney, Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. Int'l Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, pp. 65~77, Spring, 1987.
- 2) M. R. Cutkosky and Imin, Kao., Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand, IEEE transaction of robotics and automation, Vol. 5, No. 2, pp. 151~165, April, 1986.
- 3) M. A. Peshkin, Programmed Compliance for Error Corrective Assembly, IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 6, No. 4, pp. 474~482, Aug. 1990.
- 4) D. E. Whitney, Remote Center Compliance, Encyclopedia of Robotics System and Control, Vol. 2, pp. 1316~1324, edited by J. J. Diponio and Y. Hasegawa, published by Industrial Training Corporation, 1986.
- 5) M. Uchiyama, Y. Nakamura and K. Hakomori. : "Evaluation of the robot force sensor structure using singular value decomposition", Adavanced Robotics, Vol. 5, No. 1, pp. 39~52, 1991.