

# 와이어 병렬 메카니즘에 의한 로봇의 완전 자세 측정

정재원\*, 김수현\*, 박윤근\*

## Full Pose Measurement of a Robot by the Wire Parallel Mechanism

Jae Won Jeong\*, Soo Hyun Kim\*, Yoon Keun Kwak\*

### ABSTRACT

In this study, we proposed the wire parallel mechanism that can be used to measure a full pose of a robot. It is composed of six parallel links using wire. The position and orientation of the end effector of a robot are calculated using the length of wires which is measured by the encoder. The complex nonlinear equations of the forward kinematics are solved by using a numerical method, and the unique solution is obtained from the geometric configuration of the device. The length error of the wire which occurs in static condition is compensated by the relational equation that considered longitudinal extension and deflection of the wire.

Through this work, we known that the proposed device has a good accuracy( $\pm 0.01$  mm) in a large measuring region, so it can be used effectively in a calibration of a robot which required a low cost.

**Key Words** : Robotics(로봇 공학), Forward Kinematics(정기구학), Pose Measurement(자세 측정), Numerical Analysis(수치해석), Wire Parallel Mechanism(와이어 병렬 메카니즘)

### 1. 서론

점차 정밀화가 요구되는 로봇에 있어서 로봇 말단부(end effector)의 정확한 자세 측정은 중요하다. 특히 기하학적 형상에 따른 정적, 동적 변형 등은 로봇의 자세에 상당한 영향을 미치게 되므로 정확한 측정을 통해 각 인자(parameter)의 값을 보정(calibration)하는 작업이 이루어져야 한다.

로봇의 자세 측정은 사용 장비에 따라 경위의(theodo-

lite)나 레이저 경위의(laser theodolite)를 이용한 삼각화(triangulation) 측정<sup>(1,2)</sup>, 레이저 트랙킹 시스템(Laser tracking system)에 의한 측정<sup>(3)</sup> 및 LDT(Linear Displacement Transducer), LVDT(Linear Variable Differential Transformers), 다이얼 게이지와 같은 각종 센서를 이용한 측정 방법<sup>(4)</sup> 등으로 다양하게 이루어지고 있다. 최근에는 3개의 직교 좌표축을 가진 3자유도 좌표 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)를 이용하거나<sup>(5,6)</sup> 비전 시스템(vision

system)을 이용한<sup>(7,8)</sup> 방법도 많이 사용되고 있는데, 이러한 측정 장비들의 장/단점은 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of the measuring methods

	Accuracy	Advantage	Disadvantage
Triangulation	0.1mm~ 0.01mm	- Low cost	- Sensitive to operator - Need a much time
Laser system	0.1mm~ 0.1μm	- High accuracy - Static/Dynamic measure	- Very expensive - Sensitive to environment
CMM	0.1mm~ 0.1μm	- Relatively Stable - High accuracy	- Very expensive - Only position measurable
Vision system	0.1mm	- Low cost	- Low accuracy

Table 1에서 보면 피측정물인 로봇의 정밀도 (0.05~0.1mm)와 측정 가능 범위(6자유도) 및 사용자의 경제성 등을 고려할 때<sup>(9)</sup> 만족할 만한 측정 방법을 찾기란 어렵다는 것을 알 수 있다. 이는 사용된 측정 방법이 순수 로봇 보정용 측정 장비이기 보다는 기존의 측정 장비를 이용한 응용된 측정 방법이기 때문으로 로봇의 완전한 자세 측정을 위해서는 별도의 추가적인 작업이 요구된다<sup>(10,11)</sup>. 로봇의 자세 측정 장비 및 방법에 관하여 Inagaki등은 ISO 9283 과 9946에 제시된 성능 기준(performance criteria)을 만족하도록 하기 위해서는 6자유도(위치, 방위) 측정이 가능해야 하고, 충분한 정밀도와 분해능(로봇의 정밀도에 비해 1/4이상)을 가지고 있어야 하며, 측정 방법 및 장비 사용에 있어서 단순해야 할 뿐만 아니라 비용면에서 비싸지 않아야 한다고 한 바 있다<sup>(12)</sup>.

이와는 별도로 최근에 와서 순수 측정용은 아니지만 와이어를 이용한 다자유도 메카니즘(multiple degree of freedom mechanism)에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데, Ming은 와이어를 이용한 다자유도 위치 결정 메카니즘에 대한 연구를 통하여 측정하고자 하는 자유도와 사용되는 와이어 수에 따른 해석을 실시한 바 있고<sup>(13)</sup>, Kawamura등은 텔레오퍼레이션(teleoperation)을 위한 마스터 로봇(master robot)에 와이어를 사용한 바 있다<sup>(14)</sup>. 이후 Ming등은 이전의 연구 결과를 토대로 OPT-FOLLOW라는 와이어 병렬 메카니즘(wire parallel mechanism)을 만들어 정적/동적 해석을 실시한 바 있다. 이는 3자유도(x,y,φ)에 대하여 4개의 와이어가 사용된 CRWPM(Completely Restrained

Wire Parallel Mechanism)으로 n자유도에 대해서 n+1개의 와이어가 필요함을 제시하면서 와이어 사용의 타당성을 입증하였다<sup>(15-17)</sup>.

따라서 본 연구에서는 동시에 로봇의 완전한 자세(6자유도)를 측정하기 위하여 Table 1에서 제시된 장단점을 서로 보완하고, Inagaki등이 제시한 기준을 만족하면서 비교적 저 비용으로 제작 가능하고 로봇의 정밀도 측면에서 만족할 만한 수준(±0.01mm)을 가진 순수 로봇 보정용 자세 측정 장치를 제시하고자 한다. 장치는 6개의 와이어를 이용한 병렬 구조로 와이어의 길이 측정을 통해 로봇 말단부의 위치(position) 및 방위(orientation)를 구하였다. 복잡한 정기구학의 해는 수치해석적 방법을 통해 구하였으며 3가지 경우에 대해 그 결과를 살펴보았다. 또한 와이어의 특성을 고려하여 축 방향 변위 및 처짐에 대한 길이의 오차를 보상해줄 수 있는 관계식을 제시하였다.

## 2. 측정장치 사양 및 구성

### 2.1 설계 사양

본 연구에서 제시된 6자유도 측정장치(이하 "FPMD")는 Fig. 1과 같다.

직렬 링크(serial link)보다 비교적 정확한 병렬 링크(parallel link)로, 측정장치 상부와 하부를 연결하는 와이어(wire)의 길이 측정을 통해 상부 "T"자형의 중심에 대한 위치와 방위를 구하도록 하였다. 위치 정밀도는 ±0.01mm이며, 측정장치의 사양(specifications)은 Table 2와 같다.

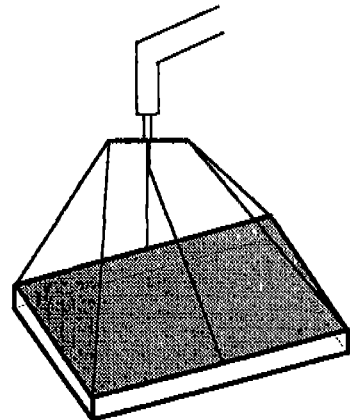


Fig. 1 Configuration of FPMD(Full Pose Measurement Device)

Table 2 Specifications of FPMD

Accuracy	Position	±0.01mm
	Orientation	0.01°
Size	Upper	100 / 50 mm
	Base	500 / 500 mm
Measuring	Position	500 × 500 × 500 mm <sup>3</sup>
Regions	Orientation	±90° (Roll, Pitch, Yaw)
Wire	Property	Piano wire
	Dimension	φ 0.6mm × 1200mm
	Resolution	0.002mm

2.2 구성

FPMD는 크게 2개로 구분될 수 있다. Figure 1에서 상부 부분은 "T"자형으로 각 끝단은 2개의 와이어가 연결되어 각각 3축 회전운동(3-DOF)이 가능토록 하였다. 이러한 형상은 "T"자형 횡 부재의 가운데 부분에서 위치를 결정하고, 수직으로 연결된 부재는 측정 지점에 대한 방향을 구하기 위한 것으로 로봇의 마지막 축 방향과 일치하도록 하였다. 또한 "T"자형 상단에는 수준기(Level)를 부착하여 좌우로 기울어진 방향을 식별 함으로서 기구학적 해석을 용이하게 하였다. 하부 부분은 바닥 판(base plate)에 6개의 구면 베어링(spherical bearing)을 설치하여 와이어의 움직임에 대해 와이어 뭉치가 와이어의 축 방향으로 따라갈 수 있도록 하였다. 이는 와이어의 특성상 꺾임에 의한 오차를 없애기 위한 것으로 그 원리는 Fig. 2와 같다.

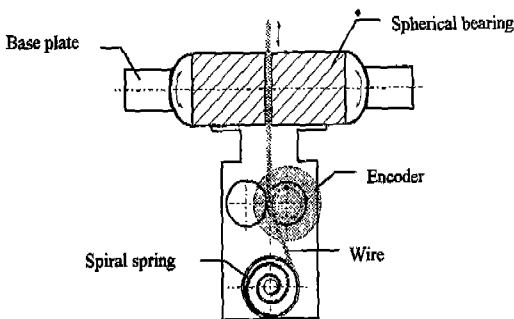


Fig. 2 Configuration of wire group

Fig. 2에서 와이어는 나선형 스프링(spiral spring)이 내부에 설치된 플리에 감겨져서 상부 부분의 움직임에 대해 인장력이 작용하여 와이어가 풀리거나 감기도록 되어 있다. 변화된 와이어의 길이는 2개의 병렬 축(shaft)사이를 지나면서 한쪽 축에 설치된 엔코더(encoder)의 회전각을 이용하여 측정한다.

3. 기구학적 해석

병렬 구조의 기구학은 직렬 구조와 반대로 역기구학은 쉽게 풀 수 있으나 정기구학은 풀기 어렵다. 병렬 구조의 대표적인 스튜어트 플랫폼(stewart platform)의 경우 각 링크의 미소 변위에 대한 해를 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으나 6자유도인 경우 해를 구하기가 어렵고 복잡할 뿐만 아니라 많은 해가 존재하게 되어 비교적 작업 영역이 큰 경우는 나타내기 어렵다.<sup>(18,19)</sup> 따라서 본 연구에서는 기하학적인 관계를 이용하여 와이어의 길이만으로 6자유도의 해를 구하고자 한다.

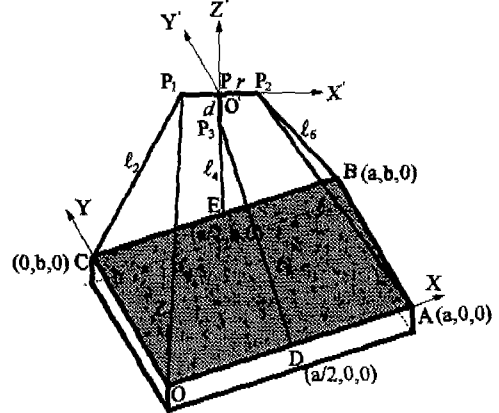


Fig. 3 Analytic model of FPMD

Fig. 3에서 각 와이어의 길이  $l_i (i=1 \sim 6)$ 는 식 (1)~(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 &= l_1^2 & (1) \\
 x_1^2 + (y_1 - b)^2 + z_1^2 &= l_2^2 & (2) \\
 (x_3 - a/2)^2 + y_3^2 + z_3^2 &= l_3^2 & (3) \\
 (x_3 - a/2)^2 + (y_3 - b)^2 + z_3^2 &= l_4^2 & (4) \\
 (x_2 - a)^2 + y_2^2 + z_2^2 &= l_5^2 & (5) \\
 (x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2 + z_2^2 &= l_6^2 & (6)
 \end{aligned}$$

여기서  $(x, y, z), (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$  는 각각  $P, P_1, P_2$  및  $P_3$  의 좌표 값이고,  $a, b$  는 Base plate 의 가로, 세로 길이이며,  $r$  과  $d$  는  $\overline{PP_2}(=\overline{PP_1})$  및  $\overline{PP_3}$  이다.

### 3.1 역기구학

식(1)~(6)은  $P_1, P_2, P_3$  의 위치를 통하여 와이어의 길이  $\ell_i (i=1\sim 6)$  를 결정하는데, 기준 좌표계에 대한  $P$  점의 위치  $\underline{P}$  가 주어지면 "T" 자형 각 끝단의 위치  $\underline{P}_i$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\underline{P}_i = \underline{P} + R_{\phi, \theta, \psi} \underline{P}_i (i=1, 2, 3) \quad (7)$$

여기서 " $\underline{P}_i$ " 는 상부 좌표계(upper frame)에 대한 "T" 자형 각 끝단의 좌표이고,  $R_{\phi, \theta, \psi}$  는 기준 좌표계에 대한 상부 좌표계의 변환 행렬(transformation matrix)이다. 따라서 각 와이어의 길이는 식(7)에서 구한  $\underline{P}_i$  를 이용하여 식(1)~(6)에서 쉽게 결정된다.

### 3.2 정기구학

정기구학은 측정된 6개의 와이어 길이만 이용하여  $P_1, P_2, P_3$  의 위치를 구하는 것으로, 우선 식(1)~(6)에서  $y_i (i=1\sim 3)$  를 구하면 식(8)~(10)와 같다.

$$y_1 = \frac{1}{2b}(\ell_1^2 - \ell_2^2 + b^2) \quad (8)$$

$$y_2 = \frac{1}{2b}(\ell_5^2 - \ell_6^2 + b^2) \quad (9)$$

$$y_3 = \frac{1}{2b}(\ell_3^2 - \ell_4^2 + b^2) \quad (10)$$

식(8)~(10)을 식(1), (3) 및 (5)에 대입하여  $z_i (i=1\sim 3)$  에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$z_1 = \pm \sqrt{\ell_1^2 - x_1^2 - \left\{ \frac{1}{2b}(\ell_1^2 - \ell_2^2 + b^2) \right\}^2} \quad (11)$$

$$z_2 = \pm \sqrt{\ell_5^2 - (x_2 - a)^2 - \left\{ \frac{1}{2b}(\ell_5^2 - \ell_6^2 + b^2) \right\}^2} \quad (12)$$

$$z_3 = \pm \sqrt{\ell_3^2 - \left(x_3 - \frac{a}{2}\right)^2 - \left\{ \frac{1}{2b}(\ell_3^2 - \ell_4^2 + b^2) \right\}^2} \quad (13)$$

한편,  $P_1, P_2, P_3$  는 기하학적으로 다음과 같은 구속식(constraints)을 만족해야 함으로,

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 = 4r^2 \quad (14)$$

$$(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2 = r^2 + d^2 \quad (15)$$

$$(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2 = r^2 + d^2 \quad (16)$$

식(8)~(13)을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -2x_1x_2 + 2ax_2 - 2\sqrt{(A-x_1^2)\{B-(x_2-a)^2\}} \\ -2\sqrt{(A-\ell_1^2)(B-\ell_5^2)} - a^2 - 4r^2 + \ell_1^2 + \ell_5^2 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} -2x_1x_3 + ax_3 - 2\sqrt{(A-x_1^2)\left\{C-\left(x_3-\frac{a}{2}\right)^2\right\}} \\ -2\sqrt{(A-\ell_1^2)(C-\ell_3^2)} - \frac{1}{4}a^2 - r^2 - d^2 + \ell_1^2 + \ell_3^2 = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} -2x_2x_3 + 2ax_2 + ax_3 - 2\sqrt{\{B-(x_2-a)^2\}\left\{C-\left(x_3-\frac{a}{2}\right)^2\right\}} \\ -2\sqrt{(B-\ell_5^2)(C-\ell_3^2)} - \frac{5}{4}a^2 - r^2 - d^2 + \ell_5^2 + \ell_3^2 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

$$A = \ell_1^2 - \frac{1}{4b^2}(\ell_1^2 - \ell_2^2 + b^2)$$

$$B = \ell_5^2 - \frac{1}{4b^2}(\ell_5^2 - \ell_6^2 + b^2)$$

$$C = \ell_3^2 - \frac{1}{4b^2}(\ell_3^2 - \ell_4^2 + b^2)$$

식(17)~(19)는 3개의 비선형 연립방정식으로 해석적으로 풀기에는 어렵기 때문에, 본 연구에서는 수치해석의 여러 방법 중 Newton-Raphson 방법<sup>(20)</sup>을 사용하여 그 해를 구하였다. 식(17)~(19)는 다음과 같이 나타낼 수 있는데,

$$f_{12}(x_1, x_2) = 0 \quad (20)$$

$$f_{13}(x_1, x_3) = 0 \quad (21)$$

$$f_{23}(x_2, x_3) = 0 \quad (22)$$

이때  $x_i$  는 2차로 식(20)~(22)의 각각에 대해서 구하면 8개의 수학적 해를 가지게 되나 식(14)~(16)을 만족하고,  $x_1 \leq x_2$  를 충족시키는 해를 구하면 2개로 줄어든다. 그런데 이 2개의 해는 수치해석에서 유일하게 결정되거란 어렵기 때문에<sup>(20)</sup> 유일 해를 결정하기 위한 다른 방법이 강구되어야 한다. 본 연구에서는 측정장치의 기하학적인 형상을 이용하여 결정하였는데, 이는 로봇의 자세 측정시 와이어의 길이에 추가하여 "T" 자형 양쪽 끝단의

기울어진 방향, 즉 축에 대한 축의 회전 방향을 판독 함으로서 해를 유일하게 결정할 수 있도록 하였다[5장 참조].

따라서 상부 부분 각 끝단,  $P_1, P_2, P_3$ 의 위치는 식 (8)~(13)을 통하여 알 수 있고, 이를 이용하면 측정하고자 하는 지점, 즉 중심의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$x = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \quad (23)$$

$$y = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \quad (24)$$

$$z = \frac{1}{2}(z_1 + z_2) \quad (25)$$

한편, Fig. 3에서 상부 부분의 방향 벡터(direction vector)  $\underline{X}, \underline{Z}$ 는 앞에서 구한  $P_1, P_2, P_3$ 의 좌표를 통하여 다음과 같이 나타낼 수 있으므로,

$$\underline{X} = \frac{1}{\|P_2 - P_1\|} (P_2 - P_1) \quad (26)$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{\|P_3 - P_1\|} (P_3 - P_1) \quad (27)$$

미지(unknown)의 방향 벡터  $\underline{Y}$ 는 오른손 법칙(right hand rule)에 의해 식(28)과 같이 결정된다.

$$\underline{Y} = \underline{Z} \times \underline{X} \quad (28)$$

따라서 기준 좌표계에 대한 Roll, Pitch, Yaw의 오일러 각(euler angle)  $R_{z,\phi}, R_{y,\theta}, R_{x,\psi}$ 을 고려하면, 식(26)~(28)에서 구한 방향 벡터는 식(29)를 만족하므로,

$$\begin{bmatrix} X'_x & Y'_x & Z'_x \\ X'_y & Y'_y & Z'_y \\ X'_z & Y'_z & Z'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서  $C_i = \cos(i)$ ,  $S_i = \sin(i)$ 이다.

결국 측정 지점의 오일러 각,  $\phi, \theta$  및  $\psi$ 는 식(29)에서 다음과 같이 결정된다.

$$\phi = A \tan 2 \left( \frac{X'_y}{X'_x} \right) \quad (30)$$

$$\theta = A \tan 2 \left( \frac{-X'_z}{\sqrt{1 - X'_z{}^2}} \right) \quad (31)$$

$$\psi = A \tan 2 \left( \frac{Y'_z}{Z'_z} \right) \quad (32)$$

#### 4. 와이어 길이 보상

FPMD에 사용된 와이어는 피아노선(piano wire)으로 축 방향의 인장력, 중력 및 기타 주위 환경의 변화에 따라 측정하고자 하는 길이에 영향을 미칠 수 있다.

##### 4.1 축 방향 변형

나선형 스프링의 인장력은 사용된 재료의 특성(property), 형상(geometry) 및 풀려진 와이어의 길이 등에 따라 결정된다.

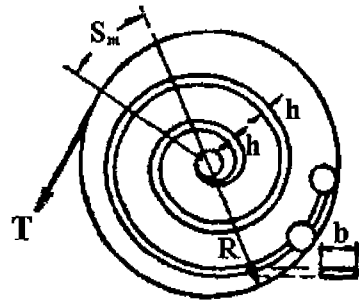


Fig. 4 Configuration of spiral spring

Figure 4에서 인장력 T는 식(33)과 같다<sup>(21)</sup>.

$$T = \frac{bh^3 E}{12L_p R^2} S_m \quad (33)$$

여기서  $b, h$ 는 스프링의 가로, 세로 길이이고,  $L_p$ 는 스프링의 길이,  $R$ 은 풀리의 반경,  $E$ 는 탄성 계수(modulus of elasticity)이며  $S_m$ 은 엔코더에서 측정한 와이어의 늘어난 길이이다.

따라서 인장력에 의한 축 방향의 변형량( $S'$ )은 식(34)와 같이 구해져.<sup>(22)</sup>

$$S' = \frac{TS_m}{AE} \quad (34)$$

실제로 고려되어야 할 와이어의 길이( $S$ )는 와이어의 단면적이  $A$ 일 때 다음과 같다.

$$S = S_m + S' = S_m \left( 1 + \frac{T}{AE} \right) \quad (35)$$

4.2 처짐 보상

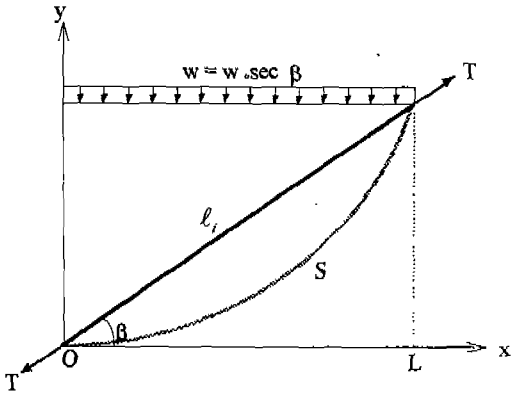


Fig. 5 Wire profile

식(35)에서 구한 와이어의 길이(S)는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 와이어의 자중에 의한 처짐(deflection)이 일어난 곡선 형태가 된다. 이러한 곡선은 FPMD의 경우 기울어진 각도  $\beta$  가  $0 \sim 90^\circ$  로 변하고 인장력(T)이 와이어의 길이(S)에 따라 변하는 가운데서 와이어의 직선 길이( $l_i$ )를 구해야 하므로, 미소 변위에 대해 고려하면,

이때, 미소 변위에 대한 와이어의 길이( $dS$ )는 식(38)과 같이 나타낼 수 있으므로,

$$\frac{dS}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (38)$$

이를 식(37)에 대입하여, 양 끝단의 경계조건 (0, 0), (L, L tan  $\beta$ ) 에 대한 2차 미분방정식을 풀면 식(39)와 같다.

$$y = \frac{1}{k} \cosh(kx + c_1) + c_2 \quad (39)$$

여기서,

$$k = \frac{w}{H} = \frac{w_0}{T \cos^2 \beta}$$

$$c_1 = \sinh^{-1} \left[ \frac{kL \tan \beta}{2 \sinh(\frac{1}{2}kL)} \right] - \frac{1}{2}kL$$

$$c_2 = -\frac{1}{k} \cosh(c_1)$$

따라서, 처짐이 고려된 와이어의 길이(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{2}{k} \cosh\left(\frac{kL + 2c_1}{2}\right) \sinh\left(\frac{kL}{2}\right) \quad (40)$$

이상에서 보면, 와이어의 직선 길이( $l_i$ )와 곡선 길이(S)는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있는데,

$$l_i = \frac{L}{\cos \beta} = f(\beta, L) \quad (41)$$

$$S = g(T, \beta, L) \quad (42)$$

식(33)과 (35)에서 엔코더의 측정값  $S_m$ 만 알 수 있으면 T와 S는 결정되어 식(41)과 (42)는  $l_i, \beta, L$  함수가 된다. 이는 많은 해가 존재하게 되는 경우로 해석적으로 풀 수 없다. 따라서,  $l_i$ 와 S와의 관계를 알아보기 위하여 와이어 직경이 0.6mm일 때, 임의의  $l_i$  및  $\beta$ 의 변화에 따른 와이어 길이의 오차 비 ( $\alpha = \frac{S - l_i}{S}$ )를 구하였다.

Table 3에서  $\alpha$ 는 동일한  $\beta$  하에서  $l_i$ 에 무관함을 알 수 있었으며, 반면 동일한  $l_i$  하에서는  $\beta$ 의 변화에 대해 미소한 차이를 보였다. 이는 본 연구에서 와이어의

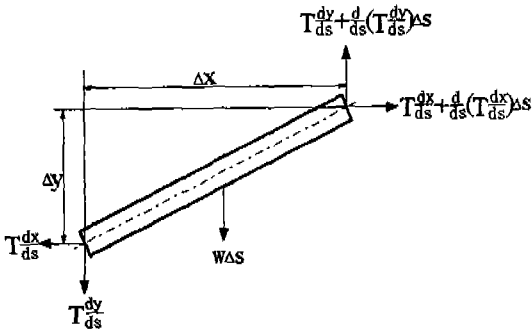


Fig. 6 Consideration of small displacement of the wire

Figure 6에서 수직 방향에 대한 힘의 평형 조건으로부터

$$\frac{d}{ds} \left( T \frac{dy}{ds} \right) = w \quad (36)$$

이 되고, 정적인 상태에서 수평 방향의 힘 ( $H = T \frac{dx}{ds}$ )은 일정하므로 식(36)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 y}{ds^2} = \frac{w}{H} \frac{ds}{dx} \quad (37)$$

측정 분해능 ( $2\mu\text{m}$ )을 고려해 볼 때 거의 일정한 값으로 볼 수 있으므로 식(43)으로 나타낼 수 있고,

Table 3 Ratios ( $\alpha$ ) of the error of a wire length

$\beta$ $\ell_i$ (mm)	Inclined Angle ( $\beta$ , degree)			
	20	40	60	80
500	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$
600	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$
700	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$
800	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$
900	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$
1000	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-6}$

$$\alpha = \frac{S - \ell_i}{S} = \text{const} \quad (43)$$

결국 와이어의 직선 길이  $\ell_i$ 는 식(35)를 대입하여 식(44)와 같이 엔코더의 측정값 ( $S_m$ )에 대하여 나타낼 수 있다.

$$\ell_i = (1 - \alpha)S_m \left( 1 + \frac{bh^3}{12AL_p R^2} S_m \right) \quad (44)$$

여기서,  $\alpha = 2.12 \times 10^{-6}$ 이다.

### 5. 수치 해석

여기서는 앞의 3장에서 언급된 기구학적인 해석 방법을  $P(x, y, z, \psi, \theta, \phi)$ 가 다음과 같은 3가지 경우에 대해 역기구학 및 정기구학적 해를 구하여 방법의 타당성을 검증하였다. 여기서  $x, y, z$ 의 단위는  $\text{mm}$ 이며,  $\psi, \theta, \phi$ 는 Roll, Pitch 및 Yaw의 오일러 각으로 단위는 degree이다.

- Case 1: P(270.000, 330.000, 600.000, 0.0°, 0.0°, 36.87°)
- Case 2: P(180.000, 150.000, 750.000, 25.0°, 10.0°, 0.0°)
- Case 3: P(250.000, 250.000, 500.000, 40.0°, 50.0°, 60.0°)

주어진 경우에 대한 역기구학은 식(7) 및 식(1)~(6)을 이용하여 와이어의 직선 길이를 구하면 Table 4와 같다.

Table 4 The Results of inverse kinematics

Case	unit: mm					
	$\ell_1$	$\ell_2$	$\ell_3$	$\ell_4$	$\ell_5$	$\ell_6$
1	709.154	672.978	641.716	576.021	725.052	644.748
2	784.345	845.693	730.000	782.157	803.345	863.344
3	627.575	649.372	534.518	543.185	587.435	563.246

정기구학은 Table 4의 결과를 이용하여 식(17)~(32)의 절차를 통해 구하면 Table 5와 같다.

Table 5 The Results of forward kinematics

Case	$z_1 - z_2$	Position (mm)			Euler angles (degree)		
		$z_1$	$z_2$	$z_3$	$\psi$	$\theta$	$\phi$
1	0	270.001	330.000	600.000	-0.007	0.0	36.870
2	-	263.180	150.000	752.740	24.999	-15.932	0.0
	+	180.000	150.000	750.000	24.998	10.000	0.0
3	-	378.050	250.000	494.690	-26.153	-18.767	36.007
	+	250.000	250.000	500.000	39.995	50.001	59.996

여기서 경우 2의 예를 살펴보면, 수치해석을 통해 구한 해는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 OY축에 대한 O'X'축의 회전 방향(+, -)에 따라 각각 1개씩 결정됨을 알 수 있다. 이는 결국 측정시 "T"자형 상단의 기울어진 방향을 이용, 즉 ( $z_1 - z_2$ ) 값의 부호를 판별할 수 있으면 유일하게 결정될 수 있음을 의미하는 것으로, 3.2절에서 제시된 방법이 타당함을 알 수 있다.

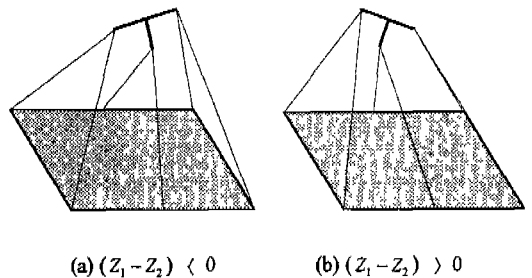


Fig. 7 Comparison of the solutions in the Case 2

이상에서 보면, 유일하게 결정된 해(Fig. 7(b))는 위치 및 오일러 각의 정밀도에 있어서 각각  $\pm 0.01\text{mm}, \pm 0.01^\circ$  이내로 비교적 정확하게 구해짐을 알 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 기존의 측정장치에 비해 비교적 정확하

고 저렴하며 사용이 용이한 와이어 병렬 메카니즘의 로봇용 완전 자세 측정장치를 제시하였다. 병렬 구조의 복잡한 정기구학은 기하학적인 형상을 이용, 수치해석을 통해 유일 해를 결정하였으며, 와이어 사용에 따른 오차는 측 방향 변위 및 처짐을 고려하여 보상하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 와이어를 이용한 병렬 구조로 이론상  $\pm 0.01mm$ 의 비교적 우수한 정밀도를 가질 수 있는 로봇용 완전 자세 측정장치를 제시하였다.
- (2) 병렬 구조의 정기구학에서 나타나는 복잡한 비선형 방정식은 기하학적인 형상을 이용 함으로서 그 해를 유일하게 결정할 수 있다.
- (3) 와이어 사용에 따른 인장력 및 처짐에 의한 오차는 보상 될 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Rourke, Industrial Robot Forward Calibration Method and Results, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 1~8, 1986.
2. R. P. Judd and A. B. Knasinsk, A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 1, pp. 20~30, 1990.
3. J. H. Gilby and G. A. Parker, Laser tracking system to measure robot arm performance, *Sensor Review*, Vol. 2, No. 4, pp. 180~184, 1982.
4. J. Zupancic, Calibration of an SMT Robot Assembly Cell, *J. of Robotics Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 301~310, 1994.
5. J. M. Renders, E. Rossignol, M. Becquet and R. Hanus, Kinematic Calibration and Geometrical Parameter Identification for Robots, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 6, pp. 721~732, 1991.
6. L. J. Everett and J. Lei, Improved Manipulator Performance Through Local D-H Cali-

- bration, *J. of Robotic Systems*, Vol.12, No. 7, pp. 505~514, 1995.
7. G. D. Van Albada, J. M. Lager, A. Visser and L. O. Hertzberger, A low-cost pose-measuring system for robot calibration, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 15, pp. 207~227, 1995.
8. M. R. Driels and U. S. Pathre, Vision-Based Automatic Theodolite for Robot Calibration, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 351~360, 1991.
9. T. Suehiro, Present Development Status of Direct-Drive Robots, *Advanced Robotics*, Vol. 5, No. 2, pp. 351-357, 1991.
10. B. Preising and T. C. Hsia, Robot Performance Measurement and Calibration Using a 3D Computer Vision System, *Robotica*, Vol. 13, pp. 327-337, 1995.
11. M. R. Driels, W. Swayze and S. Potter, Full - Pose Calibration of a Robot Manipulator Using a Coordinate Measuring Machine, *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 34-41, 1993.
12. S. Inagaki, Y. Ando and S. Suzuki, Characteristics of Measuring Equipments for Manipulating Industrial Robots, *20th Int. Symp. On Industrial Robots*, Japan, pp. 987-992, 1989.
13. A. Ming, Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires, Ph. D. Thesis, University of Tokyo, Japan, 1990.
14. S. Kawamura and K. Ito, A New Type of Master Robot for Teleoperation Using a Radial Wire Drive System, *Proc. 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and systems*, Japan, pp. 55-60, 1993.
15. A. Ming and T. Higuchi, Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires(Pare 1)-Concept, Design and Control-, *Int. J. JSPE*, Vol. 28, No. 2, pp. 131~138, 1994.



16. A. Ming and T. Higuchi, Study on Multiple Degree-of-Freedom Positioning Mechanism Using Wires(Pare 2)-Development of Planar Completely Restrained Positioning Mechanism-, *Int. J. JSPE*, Vol. 28, No. 3, pp. 235~242, 1994.
17. A. Ming, M. Kajitani and T. Higuchi, On the Design of Wire Parallel Mechanism, *Int. J. JSPE*, Vol. 29, No. 4, pp. 337~342, 1995.
18. K. Liu, J. Fitzgerald and F. L. Lewis, Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 282~293, 1993.
19. M. Husain and K. J. Waldron, Direct Position Kinematics of the 3-1-1-1 Stewart Platforms, *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 1102~1107, 1994.
20. H. P. William, A. T. Saul, T. V. William and P. F. Brian, *Numerical Recipes in C-The Art of Scientific Computing -2nd Edition-*, Cambridge Uni. press, New York, pp. 379~383, 1992.
21. 박영조, 기계 설계, 보성 문화사, 서울, p 499, 1981.
22. 김천욱, 재료역학, 등명사, 서울, pp. 42~47, 1988.