

구형 3자유도 병렬 메커니즘의 기구학 해석 및 구현

이석희*, 김희국#, 오세민**, 소병록**, 이병주**

Kinematic Analysis and Implementation of a Spherical 3-Degree-of-Freedom Parallel Mechanism

Seok Hee Lee*, Whee Kuk Kim#, Se Min Oh**, Byung Rok So**, Byung Ju Yi**

ABSTRACT

A new spherical-type 3-degree-of-freedom parallel mechanism consisting of a two degree-of-freedom parallel module and a serial module is proposed. Two alternative designs for the serial sub-chain are suggested and compared. The first design employs RU joint arrangement for the serial sub chain structure. The second design incorporates a gear chain to drive the distal revolute joint of the serial sub-chain from the base platform of the mechanism. This modification significantly improves kinematic characteristics of the mechanism within its workspace. Firstly, the closed-form solutions of both the forward and the reverse position analysis are derived. Secondly, the first-order kinematic model with respect to three inputs which are located at the base is derived. Thirdly, it is confirmed through simulation that the modified mechanism has much more improved isotropic characteristic throughout the workspace of the mechanism. Lastly, the proposed mechanism is implemented to verify the results from this analysis.

Key Words : Parallel Mechanism(병렬 메커니즘), Closed-form Solution(해석해), Kinematic Analysis(기구학 해석), Kinematic Isotropic Index(기구학 등방성 지수)

1. 서론

직렬형 구조를 가지는 구형 3 자유도 메커니즘의 해석은 상대적으로 용이하지만 외팔보 구조로 인해 발생하는 큰 처짐이나 유동 액츄에이터로 인한 큰 관성은 바람직하지 못한 약점으로 인식되고 있다. 이에 반하여, 병렬 메커니즘은 지면에 가깝게 무거운 액츄에이터를 위치시킬 수 있는 구조를 가

지고 있으며 이 때문에 유동 액츄에이터로 인한 링크의 처짐이나 관성 효과를 줄이는 효과가 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나, 대부분의 병렬 메커니즘은 정위치 해석해가 존재하지 않으며 따라서 이들의 위치해석은 계산하중으로 인한 부담이나 수치해석 계산상의 오차가 존재하는 수치해석방법에 의해 수행되어야 한다. 따라서, 위치 해석해를 가지는 다양한 형태의 다양한 자유도를 가지는 평면형 또

접수일: 2005년 6월 14일; 게재승인일: 2005년 9월 9일
* 고려대학교 대학원
교신저자: 고려대학교 제어계측공학과
E-mail : wheekuk@korea.ac.kr Tel. (041) 860-1443
** 한양대학교 전자컴퓨터공학부

는 공간형 병렬 메커니즘이 제시되고 있다.^{1,2,3}

구형 3 자유도 메커니즘에 대해서도 다양한 병렬구조를 가지는 구형 손목 메커니즘들이 제시되어 왔다.⁴⁻¹³ 기아체인을 통해 구동력을 전달하는 동일 구동축을 가지는 (coaxial) 손목 메커니즘의 형태는 Cincinnatti Milacron 산업용 로봇에 사용되었으나,⁴ 사용된 기어로 인한 높은 마찰 및 관성으로 인하여 낮은 마찰효과나 낮은 관성력이 요구되는 햅틱기와 같은 응용분야에서는 적절치 못하다. Cox와 Tesar⁵에 의해 *RRR* dyads를 사용하는 새로운 3 자유도 모듈(shoulder라 명명됨)이 제안되어 기구학 분석이 수행되었으며 Gosselin과 Hamel⁶은 이러한 구조를 카메라의 방위각을 조정하는 기기로서 사용한 바 있다. Vischer와 Clavel⁷은 이러한 *RRR*구조를 이용한 구조를 수정한 형태의 메커니즘을 제시하였는데 각 부속체인에 속한 관절들이 모두 각각 하나의 평면에 놓이도록 설계함으로써 기계적 설계를 매우 단순하게 하였다. 그러나, 이러한 구형 메커니즘들은 기본적으로 복잡한 구속된 구조를 가지므로 그 기구학 해석은 물론 동적해석을 수행하는데 있어 상당한 규모의 복잡한 과정이 요구된다. Kong과 Gosselin⁸은 세 개의 다리로 구성된 과도하게 구속되지 않은 메커니즘의 구조에 대한 합성 (synthesis)에 관한 연구를 수행하였으며 Rosheim⁹은 진기한 내포된(embedded) 선형 엑츄에이터들에 의해 구동되는 Omni-wrist를 제안하였다. Gregorio^{10,11}는 *RUU*와 *URC* 부속체인을 가지는 3 자유도 구형 메커니즘을 제안하였으며 Kurtz와 Hayward¹² 그리고 Yi 등은¹³ 이들의 힘전달비를 향상시킬 수 있도록 여유구동 구형 메커니즘을 제안하였다. 일반적으로, 대부분의 이전의 구형 손목 병렬 메커니즘은 다리들 사이의 구속으로 인하여 상대적으로 적은 작업공간을 가지고 있으며 따라서 최적설계는 구형 메커니즘의 주어진 사양을 만족하도록 수행되어야 한다.

본 논문에서는 문헌에 이미 제시된 구형 3자유도 병렬 shoulder 메커니즘²에 비하여 상당한 크기의 작업공간과 등방성 특성을 가지며 동시에 위치 해석해를 가지는 새로운 병렬 구조를 가지는 구형 3 자유도 메커니즘을 제시 한다. 이 메커니즘은 2 자유도를 가지는 병렬 메커니즘 모듈과 하나의 *RRR*형태의 관절 배열을 가지는 직렬 부속체인으로 구성된다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다. 첫째,

두 가지 형태의 설계가 제시되고 제시된 메커니즘의 구조를 기술한 후 정위치 해석과 역위치 해석이 수행된다. 그리고 메커니즘의 대략적인 작업공간의 형태와 크기 그리고 기구학 특성이 기구학 등방성 지수를 조사함으로써 규명된다. 특히, 본 연구에서 두 메커니즘의 분석은 특이형상이 없는 반구 형태의 작업공간 이내로 제한하여 수행되었으며 보다 우수한 기구학 특성을 나타내는 두 번째 메커니즘의 모형을 제작하여 메커니즘의 모빌리티, 마찰력 및 관성 효과 등을 검사함으로써 Haptic 기기로서의 응용 또는 다른 목적의 구형 메커니즘으로 적합도에 관한 가능성을 확인하였다.

2. 구형 3 자유도 병렬 메커니즘

2.1 Mobility메커니즘의 구조

Fig. 1은 제안된 메커니즘을 보여준다. 메커니즘은 yaw운동과 pitch운동을 가지는 회전 2자유도를 가지는 병렬 모듈과 메커니즘의 중앙에 위치한 *RRR*(또는 $RR\hat{R} = RU$) 형태, 즉, 세 개의 회전 관절(Revolute joint)을 가지는 직렬형 부속체인으로 구성된다. 특히, 직렬형 부속체인의 두 회전관절은 하나의 Hook 관절(또는 Universal Joint)과 동일한 운동을 가진다. 그러므로 작업공간의 중앙(즉, 출력 손잡이가 중앙에서 있는 형상)으로부터 원주방향으로 서있는 출력 손잡이의 위치가 멀어짐에 따라 출력 roll에 대한 입출력 속도 전달비는 나빠짐을 쉽게 추측할 수 있다. 이러한 사실은 4.3절에서의 시뮬레이션 결과에서 쉽게 확인될 것이다.

Fig. 2는 앞에서 언급한 첫 번째 3 자유도 구형 손목 메커니즘이 약간 수정된 두 번째 메커니즘의 구조이다. 두 메커니즘의 차이점은 *RRR* 부속체인에서 사용된 엑츄에이터 입력의 위치와 동력전달 메커니즘에 있다. 이들 두 메커니즘의 모빌리티(자유도)는 Grubler's 모빌리티 공식으로부터 아래와 같이 모두 3 자유도를 가짐을 확인할 수 있다. :

$$M = d(l-1) - \sum_i C_i = 3(8-1) - 2 \times 9 = 3 \quad (1)$$

여기서 d 는 메커니즘의 허용 운동 공간(admissible motion space)의 차원을 나타내며 본 메커니즘들의 경우 모두 3의 값을 가진다. 그리고 l 과 C_i 는 각각 지면을 포함하는 링크의 수와 관절 i 에 부과된 구속조건의 수를 나타낸다. (1)에서 미끄럼 아크와 손잡이 봉사이에 접촉부분은 하나의 회전 관절과 가

상링크 그리고 또하나의 미끄럼 관절로써 총 2개의 일자유도 관절과 하나의 가상링크로 모델하였다.

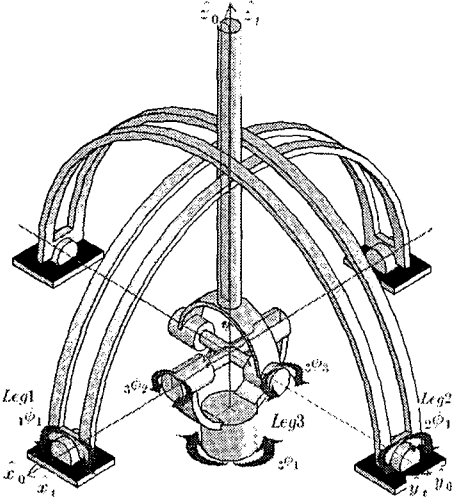


Fig. 1 Spherical 3-DOF parallel mechanism

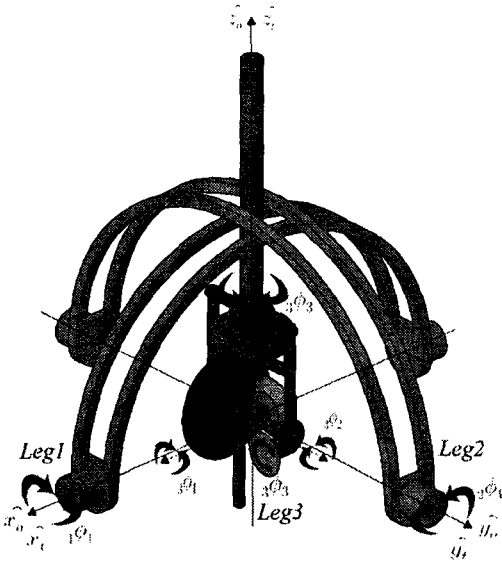


Fig. 2 Modified 3-DOF parallel mechanism

Fig. 1과 Fig. 2에 보인 바와 같이 먼저 $\{\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0\}$ 와 $\{\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1\}$ 를 각각 기저판의 중앙에 위치한 기저좌표계 그리고 상판의 중앙에 위치한 상판 좌표계라 하자. 여기서 첨자 "o"와 "t" 는 각각

기저 좌표계와 상판 좌표계를 나타낸다. 특히, Fig. 2의 형상은 기저 좌표계와 상판 좌표계가 일치하는 형상을 보여주고 있다.

Table 1에서 Table 3은 각각 Fig. 2에 보인 메커니즘의 세 직렬 부속체인의 D-H 링크 인자들을 보여주고 있다. 관절변수들 중 ${}^1\phi_2$ 는 손잡이 봉이 첫 번째 다리의 미끄럼 아크를 따라 이동할 때의 위치를 첫 번째 다리의 미끄럼 아크 면(손잡이와 아크가 놓인 평면)에 수직이며 메커니즘의 중앙에 위치한 공통교차점을 지나는 축에 대한 회전각을 나타낸다. 마찬가지로 각 ${}^2\phi_2$ 도 동일한 방법으로 두 번째 다리에 해당하는 회전각을 나타냅니다. 그리고 ${}^3\phi_1$ 는 메커니즘의 가운데 위치한 3자유도 직렬 부속체인의 지면으로부터 첫 번째 관절의 회전변위로서 첫 번째 다리의 첫 번째 관절축에 대한 회전변위와 동일하다. 유사한 방법으로 나머지 관절변위들이 정의되며 Table 1,2,3에 주어진 D-H link parameter들에서 명확히 정의되므로 여기서는 지면상 생략한다. jR 는 좌표계 $\{i\}$ 에 대한 좌표계 $\{j\}$ 의 방향코사인행렬(direction cosine matrix)을 나타낸다. 그리고 메커니즘의 출력 방위를 나타내기 위해 아래와 같이 정의되는 xyz Euler's 각 셋을 이용한다.

$${}^iR = [\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} c_\beta c_\gamma & -c_\beta s_\gamma & s_\beta \\ s_\alpha s_\beta c_\gamma + c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & -s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma & c_\alpha c_\beta \end{pmatrix}$$

Table 1 D-H link parameters of the leg 1

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
oR	0	0	0	90
o_1R	0	90	0	${}^1\phi_1 + 90$
1_2R	0	90	0	${}^1\phi_2 + 90$
2_3R	0	90	0	${}^1\phi_3$

Table 2 D-H link parameters of the leg 2

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
0_1R	0	-90	0	$2\phi_1 + 90$
1_2R	0	90	0	$2\phi_2 + 90$
2_3R	0	-90	0	$2\phi_3 - 90$

Table 3 D-H link parameters of the leg 3

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
0_1R	0	0	0	90
1_2R	0	90	0	$3\phi_1 + 90$
2_3R	0	90	0	$3\phi_2 + 90$
3_tR	0	90	0	$3\phi_3$

3. 위치 해석

3.1 정위치 해석

Fig. 1과 Fig. 2에 보인 두 메카니즘 각각의 기저 좌표계에 대한 첫 번째 다리와 두 번째 다리의 두 번째 지역좌표계는 각각 다음과 같이 표현된다. :

$$\begin{aligned}
 [{}^0_2R_{leg1}] &= [{}^1\hat{\mathbf{x}}_2, {}^1\hat{\mathbf{y}}_2, {}^1\hat{\mathbf{z}}_2] \\
 &= \begin{pmatrix} s_1\phi_2 & c_1\phi_2 & 0 \\ -s_1\phi_1 c_1\phi_2 & s_1\phi_1 s_1\phi_2 & c_1\phi_1 \\ c_1\phi_1 c_1\phi_2 & -c_1\phi_1 s_1\phi_2 & s_1\phi_1 \end{pmatrix}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

볼드

$$\begin{aligned}
 [{}^0_2R_{leg2}] &= [{}^2\hat{\mathbf{x}}_2, {}^2\hat{\mathbf{y}}_2, {}^2\hat{\mathbf{z}}_2] \\
 &= \begin{pmatrix} -s_2\phi_1 c_2\phi_2 & s_2\phi_1 s_2\phi_2 & c_2\phi_1 \\ s_2\phi_2 & c_2\phi_2 & 0 \\ -c_2\phi_1 c_2\phi_2 & c_2\phi_1 s_2\phi_2 & -s_2\phi_1 \end{pmatrix}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Fig.1과 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 ${}^1\hat{\mathbf{z}}_2$, ${}^2\hat{\mathbf{z}}_2$ 그리고 $\hat{\mathbf{z}}_4$ 은 서로 일치한다. 두 축 ${}^1\hat{\mathbf{z}}_2 = \hat{\mathbf{z}}_4$ 이 일치한다는 사실로부터 다음 식이 얻어진다 :

$$\begin{aligned}
 r_{23} &= -s\alpha c\beta = c_1\phi_1, \\
 r_{33} &= c\alpha c\beta = s_1\phi_1. \quad (5)
 \end{aligned}$$

마찬가지로, ${}^2\hat{\mathbf{z}}_2 = \hat{\mathbf{z}}_4$ 과 같이 두 축이 일치한다는 사실로부터 아래와 같은 식을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned}
 r_{13} &= s\beta = c_2\phi_1, \\
 r_{33} &= c\alpha c\beta = -s_2\phi_1. \quad (6)
 \end{aligned}$$

이들 두 식들로부터 두 회전각 α 와 β 에 대한 해는 이들 각각의 범위가 $\alpha(-90^\circ < \alpha < 90^\circ)$ 와 $\beta(-90^\circ < \beta < 90^\circ)$ 같이 제한된다고 할 때 다음과 같이 얻어진다:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \arctan2(-c_1\phi_1, s_1\phi_1), \\
 \beta &= \arctan2(c_2\phi_1 c\alpha, -s_2\phi_1). \quad (7)
 \end{aligned}$$

끝으로, Fig. 1의 메카니즘의 세 번째 다리의 출력 회전 행렬은 xyz Euler 각 셀들로 표현된 회전 행렬과 동일하다는 조건으로부터 다음과 같은 등식을 얻는다:

$$\begin{aligned}
 [{}^0_1R_{leg3}][{}^1_2R_{leg3}][{}^2_3R_{leg3}] \\
 &= Rot(\hat{\mathbf{z}}_3, \phi_3)Rot(\hat{\mathbf{x}}_3, \phi_3)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3, \phi_3) \quad (8) \\
 &= Rot(\hat{\mathbf{x}}_3, \alpha)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3, \beta)Rot(\hat{\mathbf{z}}_3, \gamma)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 [{}^0_1R_{leg3}] &= Rot(\hat{\mathbf{z}}_3, \phi_3), \\
 [{}^1_2R_{leg3}] &= Rot(\hat{\mathbf{x}}_3, \phi_3), \\
 [{}^2_3R_{leg3}] &= Rot(\hat{\mathbf{y}}_3, \phi_3). \quad (9)
 \end{aligned}$$

위 식은 아직까지 구해지지 않는 Euler 각 γ 에 대하여 아래와 같이 정리될 수 있다:

$$\begin{aligned}
 Rot(\hat{\mathbf{x}}_3, \phi_3)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3, \phi_3)[Rot(\hat{\mathbf{z}}_3, \gamma)]^{-1} \\
 &= [Rot(\hat{\mathbf{z}}_3, \phi_3)]^{-1}Rot(\hat{\mathbf{x}}_3, \alpha)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3, \beta). \quad (10)
 \end{aligned}$$

이 식에서 좌변은 이미 구해진 값이며 우변은 세 개의 변수 ϕ_2, ϕ_3, γ 의 함수이다. 따라서 식 (10)로부터 $\gamma(-90^\circ < \gamma < 90^\circ)$ 에 대한 해는 다음과 같이 구해진다. 식 (10)의 좌변과 우변은 각각 아래와 같이 표현된다:

$$Rot(\hat{\mathbf{x}}_3\phi_2)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3\phi_3)[Rot(\hat{\mathbf{z}}_3\gamma)]^{-1} = \begin{bmatrix} c_3c_\gamma & c_3s_\gamma & s_3 \\ s_2s_3c_\gamma - c_2s_\gamma & s_2s_3s_\gamma + c_2c_\gamma & -s_2c_3 \\ -c_2s_3c_\gamma - s_2s_\gamma & -c_2s_3s_\gamma + s_2c_\gamma & c_2c_3 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$[Rot(\hat{\mathbf{z}}_3\phi_1)]^{-1}Rot(\hat{\mathbf{x}}_3\alpha)Rot(\hat{\mathbf{y}}_3\beta) = \begin{bmatrix} c_1c_\beta + s_1s_\alpha s_\beta & s_1c_\alpha & c_1s_\beta - s_1s_\alpha c_\beta \\ -s_1c_\beta + c_1s_\alpha s_\beta & c_1c_\alpha & -s_1s_\beta - c_1s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta & s_\alpha & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

위 식에서 편의상 $c_{i\phi} = c_i$ 와 $s_{i\phi} = s_i$ 로 각각 표기되었다. 앞에서 언급된 바와 같이 $-90^\circ < \phi_3 < 90^\circ$ 로 제한되는 작업공간에서는 항상 $c_3 > 0$ 이므로 좌변과 우변의 (1,1)과 (1,2) 요소로부터 출력 각 γ 에 대한 해는 아래와 같이 얻어진다:

$$\gamma = \arctan2(s_3\phi_1c_\alpha, c_3\phi_1c_\beta + s_3\phi_1s_\alpha s_\beta) \quad (13)$$

그리고, Fig. 2의 메커니즘에서의 경우, 두 출력 회전각 α 와 β 에 대한 해는 동일한 과정으로 얻어질 수 있으며 액츄에이터 입력은 바로 기어체인의 회전축 상에서의 공회전을 통하여 직접 출력 축까지 전달되므로 이들 축간의 기아비가 단위 값이라고 가정하면 나머지 출력회전각 γ 는 바로 중앙축을 통해 중앙에 위치한 직렬형 부속체인의 세 번째 관절각인 ${}_3\phi_3$ 와 일치한다($\gamma = {}_3\phi_3$).

3.2 역위치 해석

Fig. 1의 메커니즘에 대한 역위치 해석은 Fig. 2의 메커니즘과 유사하므로 지면상 생략한다. Fig. 2의 모든 관절 변수들 ${}_j\phi_j (j=1, 2, 3)$ 의 범위가 $-90^\circ < \phi_j < 90^\circ$ 로 제한된다고 가정하자. Euler 각으로 표현된 메커니즘의 출력 방위각이 주어졌을 때 각 부속체인의 관절 변수들은 각각 다음과 같이 얻어진다. 첫 번째 다리에 대한 관절 변수 값은

$$\begin{aligned} {}_1\phi_1 &= \arctan2(-r_{23}, r_{33}), \\ {}_1\phi_2 &= \arctan2(r_{13}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}), \\ {}_1\phi_3 &= \arctan2(-r_{12}, r_{11}). \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 얻어지며, 두 번째 다리에 대한 관절변수

값은 아래와 같이 얻어진다:

$$\begin{aligned} {}_2\phi_1 &= \arctan2(r_{13}, r_{33}), \\ {}_2\phi_2 &= \arctan2(-r_{23}, \sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2}), \\ {}_2\phi_3 &= \arctan2(r_{21}, r_{22}). \end{aligned} \quad (15)$$

마찬가지로, 중앙에 위치한 다리에 관한 관절변수의 값은

$$\begin{aligned} {}_3\phi_1 &= \arctan2(-r_{23}, r_{33}) = \alpha, \\ {}_3\phi_2 &= \arctan2(r_{13}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}) = \beta, \\ {}_3\phi_3 &= \arctan2(-r_{12}, r_{11}) = \gamma. \end{aligned} \quad (16)$$

와 같이 얻어진다.

4. 일차 기구학 해석

4.1 일차 기구학 모델링

각 부속체인($i=1, 2, 3$)의 관절 속도 변수들 $\dot{\phi} = (\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3)^T$ 과 메커니즘의 절대 출력 속도 변수들($w = (w_x, w_y, w_z)^T$)간의 관계식은 Thomas 등¹⁴에 의해 제안된 직렬형 메커니즘의 기구학 모델링 기법을 이용하면 다음과 같이 얻어진다:

$$w = [{}^iG_\phi^w] \dot{\phi}, \quad \text{for } i=1, 2, 3 \quad (17)$$

여기서

$$[{}^iG_\phi^w] = [{}^i\hat{\mathbf{z}}_1, {}^i\hat{\mathbf{z}}_2, {}^i\hat{\mathbf{z}}_3]. \quad (18)$$

우선 메커니즘의 구동입력 벡터는 각 직렬 부속체인의 지면에 위치한 관절변수벡터로 다음과 같이 설정한다.

$$\dot{\phi}_a = [{}_1\dot{\phi}_1, {}_2\dot{\phi}_1, {}_3\dot{\phi}_3]^T. \quad (19)$$

이때, 입력관절과 메커니즘의 출력벡터사이의 속도 관계식은 Freeman 등¹⁵에 의해 제시된 좌표계 전환 기법을 적용하면 쉽게 얻을 수 있으며 그 과정은 다음과 같이 요약된다. 먼저 식 (17)의 역관계식을 구하면 다음과 같다:

$$\dot{\phi} = [{}^iG_w^\phi] w. \quad (20)$$

여기서 각 부속체인에 해당하는 역행렬은 다음과 같이 얻어진다:

$${}^iG_w^\phi = [{}^iG_\phi^w]^{-1}, \quad i=1,2,3 \quad (21)$$

식 (19)는 전체 아홉 개의 구속 관계식을 나타낸다. 이들 중 세 개의 식은 메커니즘의 출력 자유도를 나타내며 나머지 여섯 개의 식은 독립 구동 변수와 수동관절 변수사이의 구속관계식으로서 내부기구학 구속 관계식을 나타낸다.

메커니즘의 출력속도와 각 직렬 부속체인의 구동 입력과의 관계식을 나타내는 식 (20)에서의 행렬의 첫 번째 행들을 모아 하나의 행렬을 형성함으로써 입력 구동 관절 속도와 메커니즘의 출력속도와의 역속도 관계식이 얻어지며 이들은 아래와 같이 표현할 수 있다:

$$\dot{\phi}_a = [G_w^a]w, \quad (22)$$

여기서

$$[G_w^a] = \begin{bmatrix} [{}^1G_w^\phi]_1 \\ [{}^2G_w^\phi]_1 \\ [{}^3G_w^\phi]_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

다시, 식 (22)의 역관계식을 구하게 되면 다음과 같이 입력 구동 관절 속도와 메커니즘의 출력속도와의 정속도 관계식이 얻어진다:

$$w = [G_a^w]\dot{\phi}_a. \quad (24)$$

여기서

$$[G_a^w] = [G_w^a]^{-1}. \quad (25)$$

4.2 일차기구학 특성 분석

기구학등방성 지수는 메커니즘의 일차 기구학 특성을 조사하기 위하여 자주 사용되며 아래와 같이 정의된다.¹⁶

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (26)$$

여기서 σ_{\min} 과 σ_{\max} 는 각각 행렬 $[G_a^w]$ 의 최소, 최대 특이 값을 나타낸다. 이러한 등방성 지수는 입력 속도가 얼마나 출력의 모든 방향으로 균등하게 전달되어지는 가에 대한 정도를 의미한다. 특히, 출력 속도 전달비가 출력방향의 모든 방향으로 균일한 경우 등방성 지수는 단위 값을 가지게 된다. 특이형상에 가까울수록 지수 값은 점점 더 적은 값을 가지게 된다.

4.3 모의실험

본 절에서는 본 논문에서 제안된 두 가지 구형 3 자유도 메커니즘의 기구학 특성에 관하여 분석한다. 편의상, 출력 방위각은 식 (2)의 xyz Euler 각 (α, β, γ) 에 의해 표현된다. Fig. 3a) 와 3b)는 각각 Euler 각 γ 를 0° 로 고정하고 나머지 두 회전각이 $-85^\circ < \alpha, \beta < 85^\circ$ 의 범위 안에 있을 때의 Fig. 1의 메커니즘의 기구학 등방성 지수 값을 보여주는 3차원 그림과 등고선 그림이다. 그림으로부터 메커니즘은 작업공간의 중앙에 완전한 등방성 특성 ($\sigma_{KI} = 1$)을 가진 형상이 존재하지만, 중앙에서 작업공간의 경계쪽으로 갈수록 (메커니즘의 손잡이 부분이 중앙에서 측면으로 기울어질수록) 등방성 특성이 심하게 악화되는 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 과거에 제시된 대부분의 여러 가지 구조의 구형 3 자유도 병렬 메커니즘의 설계에 있어 등방성 지수의 값은 0.7이상을 넘지 않는 것으로 나타났지만,^{2,3,10} 본 논문에서 제시된 메커니즘에 존재하는 최대 값이 0.9이상인 영역은 메커니즘의 적절한 효용 분야가 있을 수 있음을 시사하고 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 Fig. 1에 보인 첫 번째 구형 메커니즘이 Euler 각 γ 를 각각 $\pm 30^\circ$ 와 $\pm 60^\circ$ 로 고정한 상태에서 나머지 두 Euler 출력 각 α 와 β 를 변화할 때 각 형상에 대한 등방성 지수의 등고선 그림을 나타낸다. 메커니즘이 기하학적으로 대칭구조를 가지므로 γ 의 값이 음수일 때와 양수일 때 서로 동일한 특성을 나타냄을 관찰할 수 있다. 또한, γ 의 값이 증가됨에 따라 기구학 등방성 지수 값은 더욱 더 나빠짐을 확인할 있다.

Fig. 6a)와 6b)는 Fig. 2에 보인 메커니즘의 기구학 등방성 지수 값을 출력 Euler 각 γ 가 0° 로 고정하고 나머지 두 출력 각 α 와 β 가 $-85^\circ < \alpha, \beta < 85^\circ$ 로 제한되는 작업공간에 걸쳐 보여주는 3차원 그림이다. 특히 Fig. 2의 모듈의 경우 가운데 위치한 직렬형 3 자유도 부속체인은 메

커니즘의 출력변수벡터인 xyz Euler 각들과 일치하는 구조($(\alpha, \beta, \gamma) = (3\phi_1, 3\phi_2, 3\phi_3)$)를 가지고 있으며 특히, 세 번째 관절은 기아체인을 이용하여 지면으로부터 직접 구동되는 구조를 가지고 있다. 따라서, Fig. 2의 모듈은 xyz Euler 각 중에서 $\alpha - \beta$ 평면에 해당하는 작업공간에 등방성 특성을 나타낼 경우 Euler 각 γ 의 모든 값에 대해(무관하게) 모두 Fig. 6과 동일한 등방성 특성을 나타낸다. 그러므로, Fig. 2의 두 번째 메커니즘이 Fig. 1의 메커니즘보다 훨씬 우수한 기구학 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

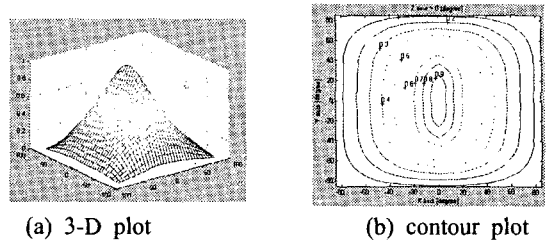


Fig. 6 Isotropic characteristic of the second module when $\gamma = 0^\circ$

5. 구현

Fig. 2에 보인 가운데 직렬 부속체인에 기아체인을 가지는 제시된 메커니즘의 기능성을 확인하기 위하여 메커니즘을 구현하였으며 Fig. 7a)은 첫 번째 모터를 구동하기 위해 사용된 벨트를 이용한 전동 시스템과 중간 부속체으로부터 메커니즘의 출력 플랫폼까지의 운동을 전달하기 위한 기아 체인으로서 편의상 Fig. 7b)에서 볼 수 있는 바와 같이 가운데 가장 커다란 헬리컬 기아의 맞은편에 부착된 중력 상쇄추를 부착하지 않은 상태를 보여주고 있다. 참고로, Fig. 7b)의 제작된 메커니즘에서 반원형 내부 아크의 반경은 9cm이다.

제작된 시스템은 α 와 β 에 대해서는 $-85^\circ < \alpha, \beta < 85^\circ$, 그리고 γ 에 대해서는 무한 회전이 가능한 작업공간을 가지고 있으며 모든 구동 액츄에이터를 지면에 설치하도록 함으로서 관성을 최소화하도록 설계되었다. 그러나, 제작과정중 일부 기어체인의 중력효과가 시스템에 적지 않은 영향을 주는 것이 감지되어 중력효과를 최소화하기 위해 기어 체인에 Fig. 7 b)와 같이 최소한의 중력 상쇄추(counter balancing weight)가 추가로 부착되었다. 특히, 제작과정에서 메커니즘의 모든 관절축이 정확히 공통교차점(메커니즘의 중앙점)을 지나지 않는 경우 매우 큰 마찰력이 발생하는 것이 관찰되었다. 즉, 편심된 기아의 회전각에 따라 마찰력의 크기가 크게 변화하는 것이 감지되었다. 이를 최소화하기 위해 가능한 모든 회전축을 조립당시에 조정할 수 있도록 설계하여 Haptic 기기로서 필요한 성능에 크게 저해가 되지 않는 정도까지 마찰력을 줄일 수 있었다. 여러 시험 작업자들은 마찰력의 크기가 충분히 적어서 제작된 메커니즘을 Haptic 기기로 이용하는데 커다란 방해가 되지 않는 정도라는 의견을 나타냈다.

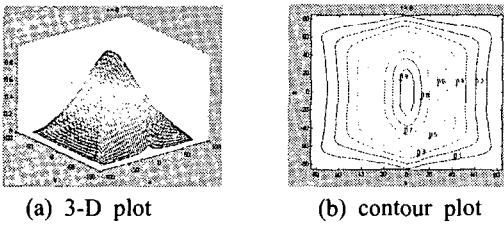


Fig. 3 Isotropic characteristic of the first module when $\gamma = 0^\circ$

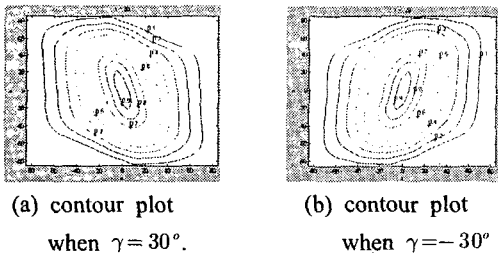


Fig. 4 Isotropic characteristic of the first module

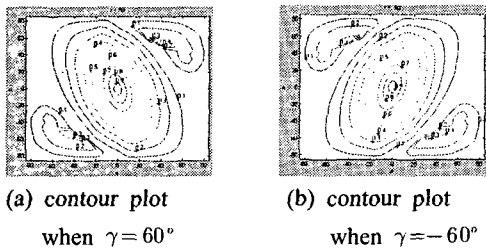
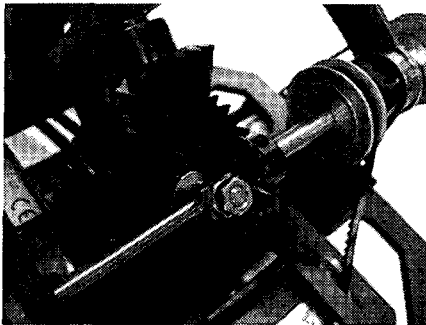


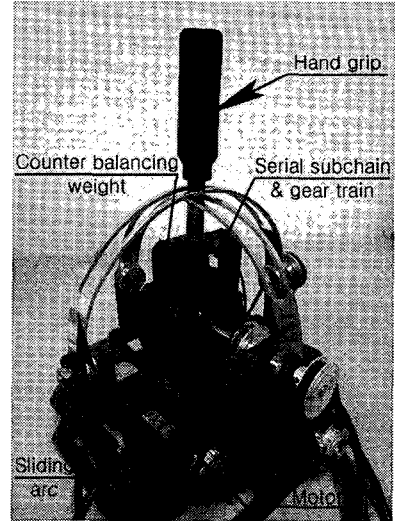
Fig. 5 Isotropic characteristic of the first module

제작된 메커니즘의 양방향 제어 모드(bilateral control mode) 성능을 시험하기 위해 메커니즘이 관절공간 ($1\phi_1, 2\phi_1$) 평면상의 주어진 구형 궤적을 얼마나 정확하게 잘 따라 가는지에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 9a)와 b)는 각각 3.6초의 주기를 가지는 구형 궤적과 이를 따라가는 Haptic 기기의 실제 궤적 추적 오차를 나타낸다. 추적오차범위는 $\pm 0.2^\circ$ 로 나타났으며 이로서 제작된 Haptic 기기의 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 메커니즘의 구동에는 PID 제어가 사용되었으며 사용된 모터와 제어기는 Mitsubishi사에서 제조한 것으로 구체적인 사양은 Table 4와 같이 요약된다.

고성능의 Haptic 기기를 구현하기 위해서는 기아체인의 마찰력 최소화, 그리고 출력 손잡이와 아크 상의 두 유도(guiding) 표면사이에 있는 마찰력 감소 등에 관한 개선이 필요한 것으로 판단된다. 따라서, 현재 메탈이 아닌 보다 가볍고 매끄러운 강화 플라스틱등과 같은 재질로 기어를 가공하여 사용하는 방안, 그리고 손잡이 축과 아크(arc) 면을 따라 존재하는 두 개의 유도 표면사이에 구형 베어링(ball bearing)을 설치함으로써 관성을 크게 늘리지 않으면서 동시에 마찰력을 최소화하는 설계, 그리고 나머지 손잡이 등에 대한 중력보완을 위해서는 중력보완제어를 통한 방법을 적용할 것을 고려하고 있다.



(a) Belt power transmission and gear train



(b) Prototype of the spherical 3-DOF mechanism
Fig. 7 Implementation of the spherical mechanism

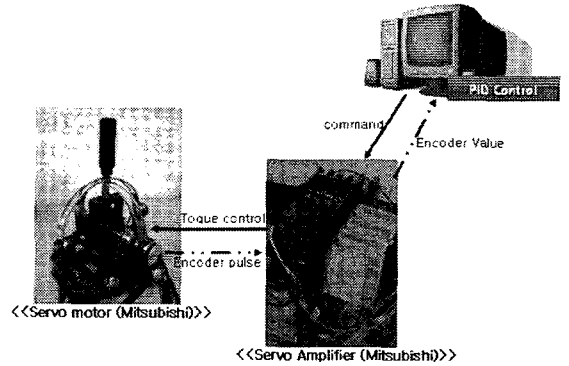
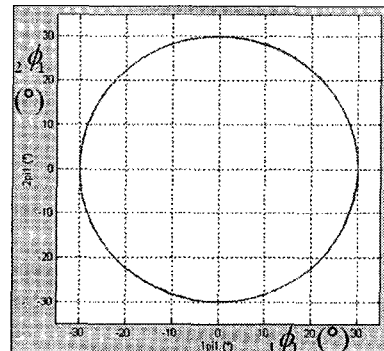
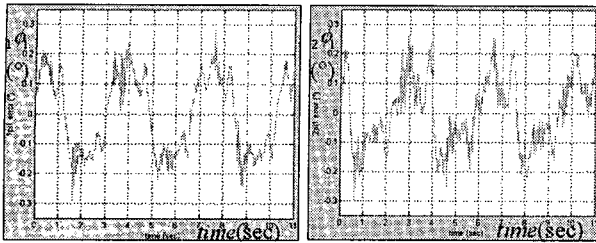


Fig. 8 Signal Flow Diagram of the System



(a) commanded / actual circular trajectory



(b) error bounds of each joint variable

Fig. 9 Trajectory following experiments

Table 4 Motor and controller specifications

Servo motor (Mitsubishi)	Servo Amplifier (Mitsubishi)
Model : HC-MF-13	Model : MR-J2-100A
Power output : 0.1 Kw	Type : PWM
nominal angular velocity : 3000r/min	Band Freq. : 250 hz
maximum angular vel. : 4500 r/min	feedback pulse from encoder : 8192 P/rev
nominal torque :0.32 Nm	Position/velocity servo control mode
Peak torque : 0.95 Mn	Torque control mode (nonlinearity ±0.3 %)
weight : 0.53 Kg	

6. 결론

본 논문에서는 두 가지 다른 유사한 형태의 구형 3 자유도 손목형 메커니즘을 제시하였으며 그들에 대한 위치해석해를 유도하였다. 또한, 기구학 등방성 지수를 이용하여 두 메커니즘의 작업공간 내에서의 기구학 특성을 조사하였으며 시뮬레이션을 통하여 기아 체인을 이용한 메커니즘이 첫 번째 형태의 메커니즘보다 상대적으로 작업공간도 클 뿐만 아니라 작업공간내에서 개선된 기구학 등방성 특성을 가짐을 확인하였다. 모형 제작을 통하여 기아체인, 벨트 전동체인, 메커니즘의 관성 그리고 마찰력의 크기 등 제반 특성에 대하여 조사하였으며 시행착오를 통하여 Haptic 기기로서 충분한 정밀도와 작업에 영향을 주지 않을 정도의 마찰력을 나타내는 메커니즘을 구현하였다. 이러한 예비분석을

통하여 기아체인을 이용한 구형 3 자유도 메커니즘은 실제 손목형 메커니즘으로서 높은 응용 가능성을 가짐을 확인하였다. 향후 연구 단계로서 현재, 의료 수술용 로봇과 연계하여 사용할 수 있는 고성능 Haptic 메커니즘으로서 구현을 위한 개선방안 및 최적의 설계인자들에 대한 규명 작업이 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 한국 보건 복지부의 한국건강 21 연구개발과제((02-PJ3-PG6-EV04-0003)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Kim, W.H., Bun, Y.K. and Cho, H.S., "Closed-form Forward Position Solution for a 6-Dof 3-PPSP Parallel Mechanism and Its Implementation," The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 1, pp. 85-99, 2001.
2. Lee, S.H., Lee, J.H., Kim, W.K. and Yi, B.J., "Analysis on Kinematic Characteristics for Spatial 3-DOF Parallel Mechanisms Employing Stewart Platform Structure," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 118-127, 2005.
3. Merlet, J.P., "Direct Kinematics of Planar Parallel Manipulators," Proceedings of IEEE Int'l conf. of Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3744-3749, 1996.
4. Craig, J.J., "Introduction to Robotics," 2nd ed. Addison Wesley, 1989.
5. Cox, D and Tesar, D, "The dynamic model of a three-degree-of-freedom parallel robotic shoulder module," Proceeding of the 4th international conference on Advanced Robotics, Columbus, OH, pp. 475-487, 1989.
6. Gosselin, C.M. and Hamel, J.F., "The Agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device," Proceeding of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC, pp. 781-786, 2002.

7. Vischer, P. and Clavel, R, "Argos: A novel 3-DOF parallel wrist mechanism," International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 1, 2000.
8. King, X. and Gosselin, C.M., "Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators," International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 3, pp. 237-245, 2004.
9. Rosheim, M.E., "Robot Evolution : The Development of Anthrobotics," John Wiley & Sons Canada, Ltd., 1994.
10. Di Gregorio, R., "A new parallel wrist using only revolute pairs: the 3-RUU wrist," Robotica, Vol. 19, No. 3, pp. 183-304, 2001.
11. Di Gregorio, R., "Kinematics of a new spherical parallel manipulator with three equal legs: the URC wrist," Vol. 18, No. 5, pp.213-219, 2001.
12. Kurz, R. and Hayward, W., "Multiple-Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy," IEEE Trans. on J. of Robotics and Automation, Vol. 8, No. 5, pp. 644-651, 1992.
13. Yi, B.J., Tesar, D. and Freeman, R.A., "Analysis of a Redundantly Actuated Fault-Tolerant Spherical Shoulder Module," Proc. ASME 22st Biennial Mechanism Conference, 1992.
14. Thomas, M. and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms," Transactions of the ASME, Vol. 104, pp. 218-228, 1982.
15. Freeman, R.A. and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," Proc. of 20th ASME Mechanism Conference, pp. 7-27, 1988.
16. Yi, B.J. and Kim, W. K., "On the Optimal Design of a Redundantly Actuated 4-Legged Six Degree of Freedom Manipulator," KSME Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 385-403, 1994.