

우수한 기구학 특성을 가지는 새로운 병렬형 구형 3자유도 메커니즘의 구현

이석희*(고려대 대학원), 김희국(고려대학교)
오세민(한양대 대학원), 이병주(한양대학교, 전자컴퓨터공학부)

Implementation of a New Parallel Spherical 3-Degree-of-Freedom Mechanism With Excellent Kinematic Characteristics

S. H. Lee (Control & Instrumentation Engr. Dept., KU), W. K. Kim, S. M. Oh (School of Electrical Engr. and Computer Sci., HU), B. J. Yi

ABSTRACT

In our pervious paper, a new parallel-type spherical 3-degree-of-freedom mechanism consisting of a two-degree-of-freedom parallel module and a serial RRR subchain was proposed[1]. In this paper, its improved version is suggested and implemented. Differently from the previous 3-dof spherical mechanism, gear chains are incorporated into the current version of the mechanism to drive the distal revolute joint of the serial subchain from the base of the mechanism and in fact, the modification significantly improves kinematic characteristics of the mechanism within its workspace. Firstly, after a brief description on its structure, the closed-form solutions of both the forward and the reverse position analysis are derived. Secondly, the first-order kinematic model of the mechanism for the inputs which are assumed to be located at the base is derived. Thirdly, through the simulations of the kinematic analysis via kinematic isotropic index, it is confirmed that the mechanism has much more improved isotropic properties throughout the workspace of the mechanism than the previous mechanism in [1]. Lastly, the proposed mechanism is implemented to verify the results from this analysis.

Key Words : parallel mechanism(병렬 메커니즘), position analysis(위치해석), kinematic analysis(기구학 분석), isotropic index(등방성 지수)

1. 서론

직렬구조의 회전형 3 자유도 메커니즘의 해석은 비교적 용이하지만 치짐과 유동 액츄에이터의 커다란 관성력은 주요한 약점으로 인지되고 있다. 이에 반하여 병렬 메커니즘은 여러 부속 체인을 가지는 구조로 인한 높은 강성과 무거운 액츄에이터를 지면 가까이 설치할 수 있게 함으로서 상대적으로 적은 치짐과 적은 관성력을 가지는 것으로 알려져 있다. 한편, 구형 3 자유도 병렬 메커니즘의 경우, 현재까지 제시된 병렬형 구조로서는 회전관절축이 공통 교차점을 갖도록 배치된 구조(3-RRR type shoulder), 또는 그 밖에 미끄럼 관절 및 회전관절을 이용한 다소

복잡한 기구학 구조 등이 있으며 이들은 직렬형 구형 3 자유도 메커니즘에 비하여 상대적으로 적은 작업공간과 우수하지 못한 기구학 특성을 가진다.[2-4] 또한, 공통적으로 이들에 대한 기구학 및 동역학 해석은 상대적으로 매우 복잡하다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 직렬형 구형 3 자유도 메커니즘의 기저판 방향에서 모든 구동 입력이 동일축(coaxial)상에서 가능하도록 기어 체인을 이용한 구조가 제시되어 실제로 활용(Cincinatti Milacron wrist)되고 있다. 그러나, 다소 많은 수의 기어체인의 활용으로 인해 예상되는 높은 크기의 미끄럼 마찰력 등은 개선의 여지가 있다.

한편, 이전 연구에서는 본 연구자들은 정위치 해

석이 존재하며 비교적 해석이 용이한 새로운 구형 3 자유도 병렬 메커니즘을 제시하였으며 이에 대한 기구학 특성 분석을 수행한 바 있다.[1] 그러나, 이 메커니즘의 경우, 2자유도 병렬 메커니즘의 중간에 위치한 부속직렬체인을 구동하는 데 있어 지면에 고정된 첫 번째 관절을 구동함으로써 작업공간의 중앙에서 벗어나는 경우 입출력 전달비가 급격히 나빠지는 경향이 확인되었으며 따라서, 보다 기구학 특성이 우수한 넓은 작업공간의 확보가 요구된다 하겠다. 이에 본 논문에서는 메커니즘의 가운데 위치한 직렬형 3 자유도 부속체인을 세 개의 관절 중 지면으로부터 세 번째 위치한 관절을 구동하도록 하여 혼합형 구형 3자유도로서의 기구학 특성을 유지하되 실제 구동은 기어체인을 활용하여 지면으로부터 할 수 있는 구형 3자유도 병렬 메커니즘을 제시한다. 그리고 이 메커니즘의 기구학해석, 기구학 특성 분석 및 구현을 통하여 실제 시스템의 성능을 확인하고자 한다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다. 먼저, 제시된 메커니즘에 대한 정위치 해석과 역위치 해석을 수행하고 메커니즘의 작업공간의 크기와 작업공간내의 기구학 특성을 조사한다. 기구학 특성분석을 위해서는 메커니즘의 일차 기구학 분석을 수행하고 얻어진 자코비안 행렬의 특이값의 최소 대 최대 값으로 정의되는 기구학 등방성 지수가 사용된다.

2. 병렬형 구형 3자유도 메커니즘

2.1 메커니즘의 구조

Fig. 1은 본 연구자들에 의해 제시된[1] 메커니즘으로서 구형 모양의 병렬구조를 가지는 회전 2-자유도 메커니즘 모듈(2-RR type 2-dof module : yaw와 pitch)과 중심부에 RRR 직렬 구조의 부속체인을 통하여 roll 운동을 입력하는 형태를 가짐으로서 모든 세 개의 입력 액츄에이터가 지면에 고정될 수 있는 구조를 가지고 있다. 특히, 회전형 병렬구조의 2 자유도 메커니즘은 guide를 따라 미끄러지는 형태를 취하고 있지만 공봉교차점에 대한 회전으로 표시될 수 있음을 유의하자. 이 메커니즘의 경우 가운데 위치한 직렬형 부속체인에서는 지면에 위치한 첫 번째 관절 즉, 지면에 수직인 관절축이 입력 관절로 사용되어 출력방위벡터의 roll 방향을 구동하는 데 있어 수동 관절들인 나머지 두 번째와 세 번째 관절이 Hook's 관절과 같은 역할을 하게 되어 작업공간의 중앙에서 멀어질수록 입출력 속도 전달비가 나빠지는 것을 예측할 수 있으며 실제 모의실험결과에서도 이 같은 사실을 확인할 수 있었다.[1]

Fig. 2는 본 연구에서 새롭게 제시하는 메커니즘으로서 그 구조는 Fig. 1에서 가운데 직렬 부속체인

을 첫 번째 관절과 두 번째 관절을 수동 Hook's 관절로 바꾸고 세 번째 관절을 구동입력 관절로 바꾼 구조를 가지고 있다. 만약 세 번째 관절을 직접 구동하게 되는 경우 구형 3자유도 메커니즘은 혼합형 구조를 가짐을 쉽게 확인할 수 있다. 이 경우, 구동 액츄에이터의 유동으로 인한 관성이 증가되는 단점이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 이 세 번째 관절을 구동하기 위하여 기어체인을 도입하였으며 fig. 2는 그 구조를 나타내고 있다. 수정된 메커니즘의 자유도는 추가된 기어 체인부분을 무시함으로써 Fig. 1와 마찬가지로 Grubler's 모빌리티 공식으로부터 $M=3(8-1)-2\times 9=3$ 자유도를 가짐을 쉽게 확인할 수 있다.

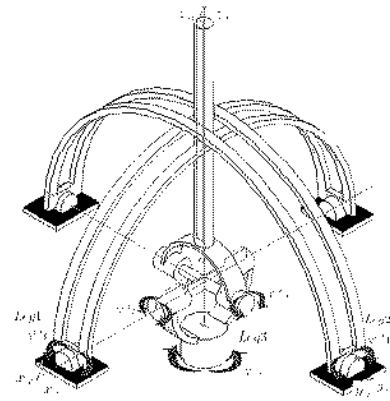


Fig. 1 A spherical 3-DOF parallel mechanism[1]

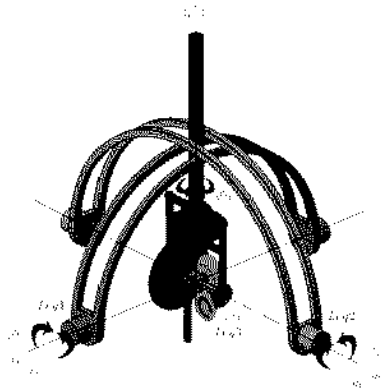


Fig. 2 A modified 3-DOF parallel mechanism

먼저, fig. 1에서와 같이 $[\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0]$ 와 $[\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1]$ 를 각각 메커니즘의 기저판과 상판에 고정된 기준좌표계와 출력좌표계로 표기한다. 특히, fig. 2는 상판좌표계와 하판좌표계가 일치된 형상을 보여주고 있다. 이때, Table 1,2,3는 메커니즘의 각 세 개의 부속직렬체인에 대한 D-H 링크 인자들을 나타낸다.

Table 1,2,3에서 iR_j 는 좌표계 $\{j\}$ 에 대한 좌표계 $\{i\}$ 의 방향코사인 행렬(direction cosine matrix)을 나

타내며 첨자 “o”와 “t”는 각각 메커니즘의 기저 좌표계(base frame)과 상판 좌표계(top frame)를 나타낸다. 그리고 메커니즘의 출력방위는 메커니즘의 출력을 고려하여 다음과 같이 정의되는 Euler angles을 이용하여 표기한다: $Rot(\hat{x}, \alpha)Rot(\hat{y}, \beta)Rot(\hat{z}, \gamma)$.

$${}^o_i R = [\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

Table 1 D-H link parameters for the Leg # 1

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
${}^o_0 R$	0	0	0	90
${}^o_1 R$	0	90	0	$1\phi_1 + 90$
${}^1_2 R$	0	90	0	$1\phi_2 + 90$
${}^2_3 R$	0	90	0	$1\phi_3$

Table 2 D-H link parameters for the Leg # 2

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
${}^o_1 R$	0	-90	0	$2\phi_1 + 90$
${}^1_2 R$	0	90	0	$2\phi_2 + 90$
${}^2_3 R$	0	-90	0	$2\phi_3 - 90$

Table 3 D-H link parameters for the Leg # 3

	a_{n-1}	α_{n-1}	d_n	ϕ_n
${}^o_1 R$	0	0	0	90
${}^1_2 R$	0	90	0	$3\phi_1 + 90$
${}^2_3 R$	0	90	0	$3\phi_2 + 90$
${}^3_t R$	0	90	0	$3\phi_3$

3. 위치해석

3.1 정위치 해석

첫 번째 leg와 두 번째 leg의 두 번째 지역좌표계는 아래와 같이 표현된다:

$${}^o_2 R_{leg1} = [{}^1_1 \hat{x}_2, {}^1_1 \hat{y}_2, {}^1_1 \hat{z}_2] = \begin{pmatrix} s_1\phi_2 & c_1\phi_2 & 0 \\ -s_1\phi_1 c_1\phi_2 & s_1\phi_1 s_1\phi_2 & c_1\phi_1 \\ c_1\phi_1 c_1\phi_2 & -c_1\phi_1 s_1\phi_2 & s_1\phi_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$${}^o_2 R_{leg2} = [{}^2_2 \hat{x}_2, {}^2_2 \hat{y}_2, {}^2_2 \hat{z}_2] = \begin{pmatrix} -s_2\phi_1 c_2\phi_2 & s_2\phi_1 s_2\phi_2 & c_2\phi_1 \\ s_2\phi_2 & c_2\phi_2 & 0 \\ -c_2\phi_1 c_2\phi_2 & c_2\phi_1 s_2\phi_2 & -s_2\phi_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Fig. 2 에서 쉽게 알 수 있는 바와 같이 ${}^1_1 \hat{z}_2$ 와 ${}^2_2 \hat{z}_2$, 그리고 출력좌표계의 ${}^1_1 \hat{z}_2$ 는 일치하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다: 즉, ${}^1_1 \hat{z}_2 = {}^2_2 \hat{z}_2$ 로부터

$$r_{23} = -s\alpha c\beta = c_1\phi_1, \quad r_{33} = c\alpha c\beta = s_1\phi_1, \quad (4)$$

그리고 ${}^2_2 \hat{z}_2 = {}^3_3 \hat{z}_2$ 로부터

$$r_{13} = s\beta = c_2\phi_1, \quad r_{33} = c\alpha c\beta = -s_2\phi_1. \quad (5)$$

이 식으로부터 α ($-90 < \alpha < 90$)와 β ($-90 < \beta < 90$)는 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha = \arctan2(-c_1\phi_1, s_1\phi_1), \quad (6)$$

$$\beta = \arctan2(c_2\phi_1 c\alpha, -s_2\phi_1). \quad (7)$$

그리고 γ 는 Fig. 2와 같이 세 번째 다리의 세 번째 관절축이 지면에 고정된 구동관절로부터 기어체인을 이용하여 구동되는 구조를 가지고 있으므로 다음과 같다.

$$\gamma = {}_3\phi_3 \quad (8)$$

3.2 역위치 해석

모든 관절변수 ${}_i\phi_j$ ($i, j = 1, 2, 3$)가 $-90 < {}_i\phi_j < 90$ 의 범위내로 제한된다고 가정한다. 출력좌표계의 방위가 Euler angles로 주어진다고 할 때, 출력 행렬은 (1)과 같이 주어지게 되며 이때, 각 직렬 부속 체인의 관절변수는 각각 다음과 같이 구해진다. Leg #1에 대한 관절각은 각각

$${}_1\phi_1 = \arctan2(-r_{23}, r_{33}), \quad (9)$$

$${}_1\phi_2 = \arctan2(r_{13}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}), \quad (10)$$

$${}_1\phi_3 = \arctan2(-r_{12}, r_{11}), \quad (11)$$

leg # 2의 관절각은 각각

$${}_2\phi_1 = \arctan2(r_{13}, r_{33}), \quad (12)$$

$${}_2\phi_2 = \arctan2(-r_{23}, \sqrt{r_{21}^2 + r_{22}^2}), \quad (13)$$

$${}_2\phi_3 = \arctan2(r_{21}, r_{22}). \quad (14)$$

끝으로, leg # 3의 구조는 Fig. 2와 같이 부가적으로 세 번째 다리의 세 번째 관절축이 지면에 고정된 구동관절로부터 기어체인을 이용하여 구동되는 구조를 가지고 있을 뿐 Euler angles로 표현된 출력방위 행렬 (1)과 동일하므로 세 번째 다리의 각 회전각은 다음과 같이 얻어진다.

$${}_3\phi_1 = \arctan2(-r_{23}, r_{33}), \quad (15)$$

$${}_3\phi_2 = \arctan2(r_{13}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{12}^2}), \quad (16)$$

$${}_3\phi_3 = \arctan2(-r_{12}, r_{11}), \quad (17)$$

4. 일차 기구학 해석

4.1 일차 기구학 모델링

각 직렬 부속 체인(leg # 1, 2, 3)의 관절입력속도 ${}_i\dot{\phi} = ({}_i\dot{\phi}_1, {}_i\dot{\phi}_2, {}_i\dot{\phi}_3)^T$ 와 메커니즘의 절대각속도 출력 $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 사이의 속도 관계식은 Thomas et al.[5]의 기구학 모델링 방법으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = [{}_i G_\phi^\omega] {}_i\dot{\phi}, \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

여기서

$$[{}^i G_{\phi}^a] = [{}^i \hat{z}_1, {}^i \hat{z}_2, {}^i \hat{z}_3] \quad (19)$$

특히, 구동입력은 각 부속체인의 맨 아래 지면에 부착된 관절로 구성한다고 하면 구동입력 속도벡터

$$\dot{\phi}_a = [{}^1 \dot{\phi}_1, {}^2 \dot{\phi}_1, {}^3 \dot{\phi}_3]^T \quad (20)$$

에 대한 출력 속도 관계식은 다음과 같은 Freeman et al.[6]에 의해 제시된 좌표계 전환기법을 적용함으로써 쉽게 얻어진다. 각 다리의 입력속도와 메커니즘의 절대각속도 출력사이의 역관계식은 (18)으로부터 각각 다음과 같이 얻어진다:

$${}^i \dot{\phi} = [{}^i G_v^{\phi}] \omega \quad (21)$$

여기서

$$[{}^i G_v^{\phi}] = [{}^i G_{\phi}^a]^{-1}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

(21)은 메커니즘의 관절속도변수 아홉 개와 출력 속도변수 세 개 사이의 기구학 관계식으로서 이 중 세 개의 관계식은 메커니즘의 자유도를 나타내며 나머지 여섯 개는 내부 기구학 구속 관계식을 나타낸다.

앞에서 언급한 바와 같이 각 부속체인의 첫 번째 관절을 입력 속도변수로 지정하였으므로 행렬식 (21)의 첫 번째 행에 해당하는 입력관절속도변수의 관계식을 모아 하나의 행렬식으로 표현하면 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{\phi}_a = [G_v^a] \omega \quad (23)$$

여기서

$$[G_v^a] = \begin{bmatrix} [{}^1 G_v^{\phi}]_1 \\ [{}^2 G_v^{\phi}]_1 \\ [{}^3 G_v^{\phi}]_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

이 식은 입력속도와 출력속도사이의 역관계식을 나타내며 정속도 관계식은 위 식의 역행렬을 취함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = [G_a^v] \dot{\phi}_a \quad (25)$$

여기서

$$[G_a^v] = [G_v^a]^{-1} \quad (26)$$

4.2 일차 기구학 해석

기구학 등방성 지수는 메커니즘의 일차 기구학 특성을 조사하기 위하여 활용되며 다음과 같이 정의된다.[7]

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (27)$$

여기서 σ_{\min} 과 σ_{\max} 는 각각 행렬 $[G_a^v]$ 의 최소, 최대 특이값을 나타내며 이러한 기구학 등방성 지수가 의미하는 바는 입력속도가 주어졌을 때, 출력방향으로 얼마나 균등하게 입출력속도의 전달특성을 가지는가를 나타낸다. 모든 방향으로 균등한 입출력 속도 전달비가 유지되는 형상에서의 값은 단위값을 가지게 되며, 비 균등한 입출력 속도 전달비를 가지게 되

면 값이 영에 가까운 값을 가지게 된다.

4.3 모의실험

기구학 등방성 지수를 이용하여 본 논문에서 제시된 구형 3 자유도 병렬 메커니즘의 기구학 특성을 조사하였다. 다음의 모의실험에서 메커니즘의 출력방위는 편의상, 식 (1)에 정의된 Euler angles(α, β, γ)로 나타내었다. Fig. 3은 메커니즘의 출력변수중 하나인 γ 를 0° 로 고정하고 나머지 두개의 출력변수 α 와 β 를 $-85^\circ < \alpha, \beta < 85^\circ$ 범위 내에서 변화할 때의 각 형상에서 메커니즘의 기구학 등방성지수를 3차원 그림과 등고선 그림으로 표기한 것이다. 그림으로부터 이 메커니즘은 작업공간의 중앙부분에서 완벽한 등방성 특성을 가지며 중앙에서 멀어짐에 따라 등방성 특성이 점차 나빠짐을 확인할 수 있다. 각 γ 의 변화에 대한 메커니즘의 기구학 등방성 특성을 보여주는 그림은 γ 의 값에 무관한 관계식 (7)로부터 Fig. 3과 동일한 기구학 특성을 유지함을 알 수 있다. 전반적으로, 구형 3 자유도 전 작업공간에 걸쳐 비교적 우수한 기구학 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

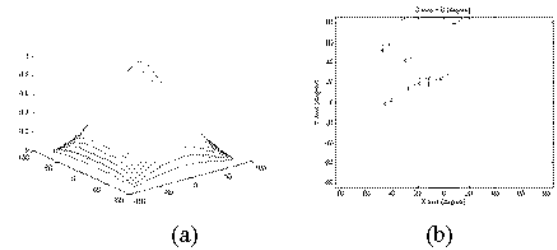


Fig. 3 a) 3-D plot and b) contour plot when $\gamma = 0^\circ$.

한편, Fig. 4a)와 4b)는 Fig. 3와 동일한 조건하에 얻어진 Fig. 1에 보인 메커니즘의 기구학 특성을 나타낸다. 마찬가지로, fig. 5a)와 fig. 5b)는 그리고 fig. 6a)와 fig. 6b)는 각각 Fig. 1에 보인 메커니즘에[1] 대해 각각 γ 를 $\pm 30^\circ$ 와 $\pm 60^\circ$ 로 고정하고 나머지 두개의 출력변수 α 와 β 를 변화할 때 메커니즘의 등방성 특성을 등고선 그림으로 나타낸 것이다. 메커니즘이 대칭구조이므로 이 모의 실험 결과에서도 각 γ 의 값이 부호만 다른 경우에서 서로 대칭특성을 나타냄을 다시 한번 확인할 수 있다. 대체로 γ 의 값이 커질수록 기구학 등방성 특성이 매우 나빠짐을 확인할 수 있다. 이상의 비교로부터 Fig. 2에서 제시된 메커니즘의 기구학 등방성 특성이 출력변위 γ 와 관련된 작업공간에서 Fig. 1의 메커니즘보다 월등하게 향상되었음을 확인할 수 있다.

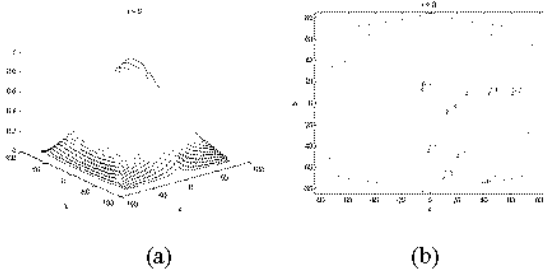


Fig. 4 a) 3-D plot and b) contour plot when $\gamma = 0^\circ$.

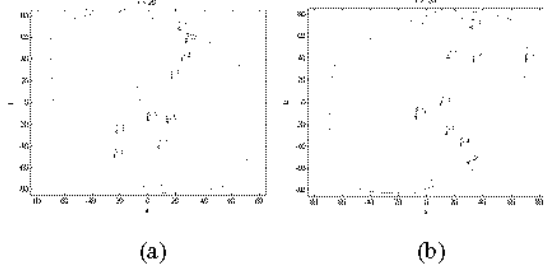


Fig. 5 3-D plot and contour plot when a) $\gamma = 30^\circ$ and b) $\gamma = -30^\circ$

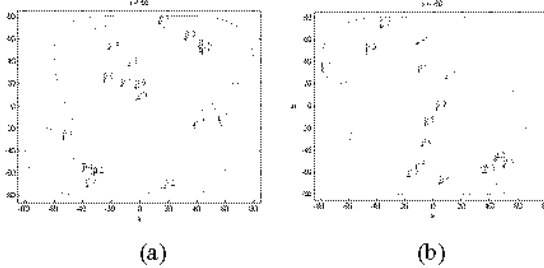


Fig. 6 3-D plot and contour plot when a) $\gamma = 60^\circ$ and b) $\gamma = -60^\circ$

5. 결론

본 논문에서는 이전 논문에서 제시된 구형 3-자유도 병렬형 메커니즘을 개선하였으며 개선된 메커니즘의 위치 해석, 기구학 해석 및 특성 분석을 수행하였다. 모의 실험을 통하여 개선된 메커니즘이 작업공간의 중앙부분뿐만 아니라 전 지역에 걸쳐서 매우 우수한 등방성 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 실제로 Fig. 7과 같이 시스템의 구현을 통하여 이를 확인하였다.

특히, 제시된 메커니즘은 정위치 및 역위치 해석해가 존재하며 메커니즘의 모든 구동입력이 지면에 위치하여 관성효과를 최소화 된 특성을 가지고 있다. 또한, 상대적으로 넓은 작업공간과 전 지역에 걸쳐 매우 우수한 기구학 특성을 가지는 있다는 점에서 매우 유용한 적용 분야를 가질 것으로 예상된다. 향후 본 메커니즘은 Haptic 기구로서 그리고 그 밖의 적용분야에 관한 연구가 진행될 예정이다.

후기

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

참고문헌

1. 최기영, 이석희, 김희국, 이병주, "새로운 병렬형 구형 3자유도 메커니즘의 기구학 특성 분석," 한국정밀공학회 춘계 학술회의, 2004, pp.1200-1203.
2. Lee, K. M. and Shah, D. K., "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator, Proceedings of IEEE Int'l conf. of Robotics and Automation, pp. 345-350, 1987.
3. Kim, W.K., Yi, B.J., Tosunoglu S., "Study on the Kinematic Characteristics of A New 3 Degree-of-Freedom Parallel Mechanism," '98 WAC conf. 1998.
4. 김희국, 이준용, 이병주, "두 형태의 3 자유도 병렬형 매니플레이터의 기구학적 특성 분석," 로봇텍스.제어계측.자동화 종합학술대회, pp. 252-257, 1996.
5. Thomas, M. and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms," Transactions of the ASME, vol. 104, pp. 218-228, 1982.
6. R.A. Freeman and D. Tesar, "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.
7. 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.

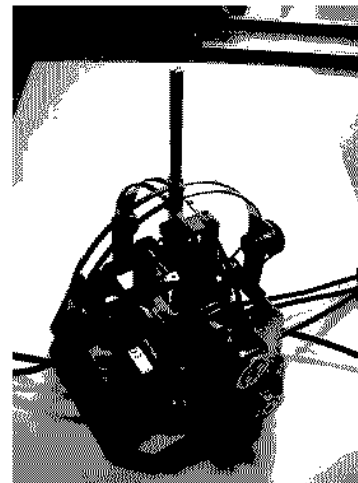


Fig. 7 The Implemented 3-dof Haptic mechanism