

정밀조립을 위한 병렬다관절 구조를 가진 로봇손목기구의 개발

문창렬, 조형석
한국과학기술원 정밀공학과

Development of a Parallel Link Typed Wrist for Robotic Precision Assembly

Chang Youl Moon, Hyung Suck Cho
Department of Precision Engineering and Mechatronics,
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, a parallel link typed wrist is developed for robotic precision assembly. The developed wrist can make the corrective motion required for compensating lateral and tilting errors. The mechanism of this wrist is one example of a motion simulator generating 6 DOF motion in space by 6 actuators connected in parallel. To make the wrist more compact, miniature DC motors containing reduction gears and servo system were used. The parallel link architecture enables a high positioning accuracy and high nominal load capacity. In this study, inverse kinematic problem is solved by using a Denavit - Hartenberg method and a simulational result about workspace of the proposed parallel mechanism is obtained.

1. 서 론

산업용 로봇이 등장하면서 메카트로닉스 관련기술의 진보와 더불어 그 응용분야는 전체 산업영역에 고루 퍼져 있다고 할수 있다. 특히 조립산업분야에 국한시켜 볼 때에 SCARA 형태의 수평다관절형 로봇이 주종을 이루고서 자동화에 많은 기여를 하고 있음을 볼 수 있다. 이들 산업용 로봇은 정밀화, 고속화를 지향한 결과 SCARA의 경우 대부분의 상용화된 모델이 $\pm 0.05\text{mm}$ 의 정밀도를 갖고 있으며 작동속도 또한 9m/sec 의 고속성을 내는 것도 있다. 그러나 일반적으로 종래의 로봇은 구조적으로 각 조인트 및 액츄에이터가 직렬적(Serial)으로 배치되어 있기 때문에 두가지 큰 취약점을 갖고 있다. 즉, 속도를 증가시키기 위해서는 정밀도를 낮춰야 하는 문제와, 가반증량을 키우기 위해서는 각 액츄에이터의 소요되는 파워가 커져야 되고 위치정밀도가 낮아지는 문제점이 있다. 가장 정밀성을 요구하는 조립작업에 쓰이는 로봇의 경우(SCARA) 위치 정밀도를 높이기 위해서는 액츄에이터 및 각 링크 구조를 재설계해야 되고 이에 따라 고속성이 희생되는 문제가 있기 때문에 대개 자유도(D.O.F)는 4개를 가지게하고 반복위치오차는 앞서 언급한듯이 $\pm 0.05\text{mm}$ 를 기준으로 하고 있다.[1] 이러한 수평다관절형 로봇을 사용하여 조립작업을 수행하기 위해서 공정 설계자는 필요한 손목기구(Wrist)를 제작하여 주어진 부품사양에 적합한 동작을 얻게 하는데, 여기서 자유도는 1~2개 증가할수 있으나 전체적인 위치오차는 로봇의 첨단부에서 커지게 된다. 따라서 정밀한 조립작업이나 복잡한 형태의 조립동작을 요구하는 경우에는 전혀 새로운 조립손목기구 및 조립알고리즘을 필요로

하게 된다. 이때 로봇은 일종의 위치결정 기구(Positioning Device)로 간주되고 필요한 자유도 및 정밀도를 갖는 첨단부(End effector)와 손목(Wrist) 사이에 부착되는 새로운 개념의 매니플레이터가 제안되어야 한다. 본 논문에서는 조립을 위한 로봇의 작업성 향상을 위하여, 인간의 손목이 내는 섬세하고 복잡한 조립 동작을 모사하는 6자유도를 갖는 손목으로서 병렬 다관절 구조를 갖는 메카니즘을 채택, 설계하여 그 특성을 파악하는 것을 연구목표로 한다.

병렬 다관절 구조 매니플레이터(Parallel Type Manipulator, 이하 PM으로 약칭)란 현재 흔히 보는 로봇구조인 연쇄적 또는 직렬적(Serial)인 링크, 액츄에이터간의 연결 방법과는 달리 로봇 6개가 하나의 뒷 원판을 움직인다는 개념으로 설계된 구조로서 메카니즘은 1800년도부터 알려져 왔으나[2] 실제로 제작, 사용되기 시작한 것은 1960년대 부터이다[3]. 병렬다관절 구조를 가진 메카니즘은 전반적으로 "Stewart Platform 메카니즘"으로 불리우는데 정확한 구조는 그림 1과 같다. 즉 고정된 뒷원판(Base Plate)과 움직이는 뒷 원판(Moving Plate)사이에서 6개의 리니어 액츄에이터가 Spherical Joint - Spherical Joint 또는 Spherical Joint - Universal Joint로 연결되어진 구조를 가지고 있다. 이러한 구조는 자체의 특성상 쉽게 짐작할 수 있듯이 매니플레이터 자체 중량 또는 액츄에이터 파워당 가반증량이 매우 큰 특성을 가지고 있다. PM의 연구현황은 크게 이론적 연구와 Prototype의 설계 제작 등 응용분야로 나뉘어서 점차 활기를 띠고 진행되고 있다. 대부분의 기존 연구내용은 Stewart Platform에 대한 기구학적 해석, 동특성 해석 및 특이점 분석 등이 주종을 이루고 있다고 할 수 있다. Hunt[4]는 Stewart Platform을 매니플레이터의 관점에서 이해하여 사용할 때의 장단점을 언급하였고, Duffy[5]는 단순한 페루트형 메카니즘에서의 역기구학(Inverse Kinematics)을 해석하였는데 본격적으로 전체구조의 매니플레이터로서의 가능성에 대한 해석적 접근은 Yang과 Lee[6] 등에 의해 이루어졌다고 할수 있다.

역기구학은 여러 연구자들에 의해 Closed-form으로 구해졌는데 여기서는 주로 Denavit-Hartenberg 행렬을 이용한 방법[7]을 적용한 경우와[8], 순수한 기하학적 관계를 이용하여 해석한 경우[6] 및 Screw 이론을 적용하여 해석한 경우[9] 등을 예로 들 수 있다. Fichter[10]는 Stewart Platform 구조에 근거한 매니플레이터의 기구학 및 동력학 모델링의 일반화된 이론을

중합하고 있다. 이후의 연구동향으로는 주로 특이점에 대한 해석[10,11]이나 작업영역 해석[10,12] 등을 들 수 있는데 모델링의 과다한 비선형성등에 의해 대부분 수치해석방법에 의존하고 있다. Stewart Platform 구조가 아닌 새로운 구조의 PM도 몇가지씩 점차 개발되어 연구가 이루어지고 있다. Kohli[13] 등은 Rotary-Linear [R-L]액츄에이터를 각각 세개씩 사용하여 6자유도를 갖는 PM을 설계하고 이에 대한 Inverse 및 Forward Kinematics에 대한 해석을 하였다. 이들의 메카니즘에서도 역시 역기구학이 정기구학에 비해 상대적으로 쉽게 해결되지만 4차방정식을 수치 해석적으로 풀어야 하는 문제점을 보이고 있다. 정기구학은 16차 방정식을 풀어야 해결되는 것을 또한 보고하고 있다.

Pierrot등은[14] 세개의 모터로 액츄에이터로 사용하고 Spherical Joint들로 이루어진 세쌍의 평행사변형 구조를 가진 PM을 개발하였는데 이는 두개의 롤링 자유도 및 한개의 직진 자유도로 결국 3자유도를 가진 메카니즘이다. Shahinpoor[15] 는 Stewart Platform구조를 개조하여 3자유도를 내는 PM을 직렬로 여러층을 배치한 복합구조(Hybrid Type) 매니플레이터를 제안하고 이에 대한 역기구학을 풀었다. 이 구조는 2층으로만 제작한 경우 결국 6자유도를 첨단부에서 얻을 수 있는데 Prototype의 높이가 10ft이고 자체중량이 34 lbs이며 가반중량은 160 lbs로 보고되고 있다. 이들 색다른 구조의 PM들은 대체로 본체가 무겁고 크기 때문에 기존의 직렬형 매니플레이터의 첨단부에 손목기구로 설치하는 데에는 문제가 있다고 할 수 있다.

손목기구로 사용하기 위한 시도의 하나로서 Arai등은 액츄에이터로서 압전소자 구동장치를 채택한 마이크로 PM을 개발하였다.[16,17] 이 마이크로 PM은 리니어 액츄에이터로서 압전소자를 사용하였기 때문에 동작영역이 수 μm 뿐이어서 모델링시에는 선형화 기법을 적용하였다. 이 PM은 생물학에서 단위세포들의 Handling 등 미세운동 등을 목적으로 연구되고 있다. 그림 2에 이상에서 예들 든 PM을 나타내었다.

본 연구는 병렬 다관절 구조를 가진 소형, 경량화 지향의 6자유도 매니플레이터를 개발하여 로봇의 손목기구로서 부착하기 위해 기존 Stewart Platform에서 사용된 리니어 액츄에이터 대신에 로터리 액츄에이터와 링크구조를 가진 새로운 형태의 PM을 설계하고 이의 위치 및 자세제어를 위해 기구학을 모델링하는 해석작업을 행한 결과와 제안된 PM의 동작영역에 대한 시뮬레이션 결과를 서술한다.

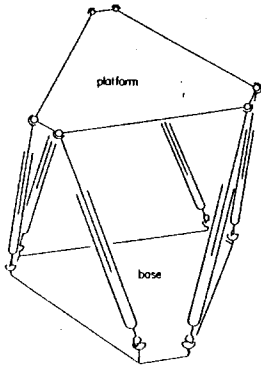


그림 1 Stewart Platform 메카니즘

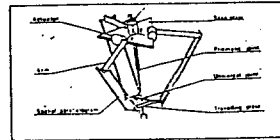
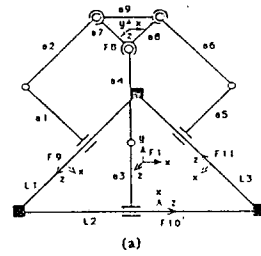
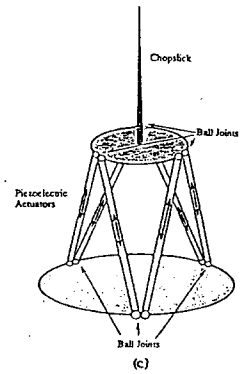


그림 2 (a) R-L Manipulator [13]
(b) DELTA Manipulator [14]
(c) Micro-manipulator [17]



2. 병렬 다관절 구조를 가진 로봇 손목기구

2.1 병렬 다관절 구조 기구 설계

본 연구에서 설계한 병렬 다관절 구조의 로봇 손목기구는 그림 3과 같다. 소형 경량화를 목표로 하였고 6자유도를 얻을 수 있어야 하므로 감속기와 타코미터가 내장된 소형 DC모터 6개를 방사상으로 배치하였고 밑 원판(Base Plate) 과 윗 원판(Moving Plate) 간의 연결은 양단에 Spherical Joint가 부착된 6쌍의 링크로 이루어지게 하였다.

본 연구에서 사용된 DC모터의 사양은 표 1과 같다. 이 서어보 시스템의 작동원리를 그림 4에 나타내었는데 회전각에 비례하는 폭을 가지는 지령펄스가 입력으로 주어지고, 이 펄스는 One-Shot의 Trigger신호로 가해진다. 모터가 회전하게 되면 내부에 있는 전위차계의 저항값이 변함에 따라 One-Shot의 RC값이 바뀌므로 출력 펄스의 폭이 변하게 된다. 이 출력펄스와 원하는 회전각에 비례하는 지령펄스가 비교기에 의해 비교된 후 위치 오차에 비례하는 폭을 갖는 펄스가 출력된다.

이 펄스폭 변조된 오차펄스 신호를 저역 필터링(Low Pass Filtering)하여 아날로그 신호를 얻게되며 구동 앰플을 통해 모터를 구동하게 된다. 표 2-1에서 알 수 있듯이 펄스폭 1520 μs 가 회전중심이 되고 이를 중심으로 펄스폭을 증감시킴으로써 원하는 회전위치에 도달 할 수 있다.

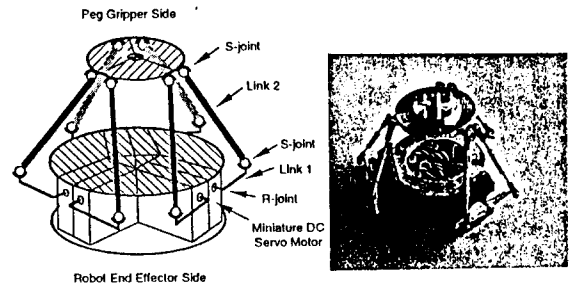
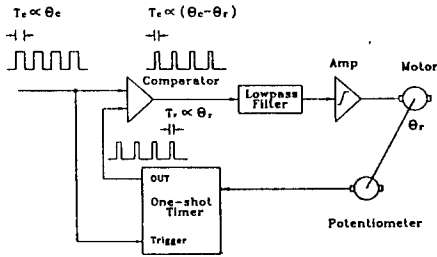


그림 3 6-RSS 병렬 다관절 구조 손목기구

Control system	(+)pulse control, 1520µs neutral, S125 1310µs neutral, S25
Operating angle	140 degrees or greater, rotary type (including trim component)
Power requirement	4.0V to 6.6V (shared with receiver)
Power consumption	8.0V, 8mA (at Idle)
Output torque	8kg-cm
Dimensions	45.5 x 23.0 x 44.4mm
Weight	60g

표 1 Miniature DC-motor 사양



• θ_c : command angle
• θ_r : response angle

그림 4 모터의 작동원리

2.2 직렬, 병렬 다관절 구조의 특성 비교

직렬 (serial) 구조 매니퓰레이터와 병렬 (parallel) 구조 매니퓰레이터의 특성을 비교하면 여러가지 측면에서 매우 흥미로운 양면성(duality)을 보이는 것을 알 수 있다.(그림 5) 즉 실용적 측면의 장 단점을 반대로 가지고 있으며 해석적인 관점에서의 난이도 또한 서로 반대의 경향을 보이고 있다.

현재까지는 이러한 양면성에 대한 만족할 만한 연구 결과는 나와 있지 않으나 두가지 형태의 매니퓰레이터를 이용하는 관점에서 살펴 볼 때는 서로 보완기능을 갖도록 하는 것이 유용하다고 할 수 있다. 즉 PM은 그 개념이 형성된 시기가 짧고 기존의 매니퓰레이터와 상이한 점이 많고 아직 해결해야 할 이론적인 문제점들이 남아 있지만, 로봇을 이용한 작업 기능에서 나름대로의 장점들을 보유하고 있으므로 점차 그 이용 범위가 확대되어 갈 것이다.

Parallel Manipulator	Serial Manipulator
동작 영역이 좁다	동작 영역이 넓다
각 joint 역주에이터가 가반 중량을 분담한다	각 joint 역주에이터가 Base 쪽으로 부하로 작용한다.
각 역주에이터의 위치 오차가 누적되지 않는다	각 역주에이터의 위치 오차가 첫단부터 누적되어간다
같은 크기의 작업 영역에 대해 동작 속도가 빠르다	같은 크기의 작업 영역에 대해 동작 속도가 느리다
Forward Kinematics Problem ⇒ 풀기 힘들다	Forward Kinematics Problem ⇒ 풀기 쉽다
Inverse Kinematics Problem ⇒ 풀기 쉽다	Inverse Kinematics Problem ⇒ 풀기 어렵다

그림 5 Parallel & Serial Manipulator

3. Forward, Inverse Kinematics 해석

앞절에서 제시한 병렬다관절 구조를 가진 손목기구의 운동학적인 관계를 알아 보기 위해서 Serial Manipulator의 각 Joint Link 간 운동을 Transformation Matrix로 나타낸 Denavit- Hartenberg 형법을 적용하기로 한다.

6개쌍의 Motor, Link, Joint중 임의의번째에 대해서 Mechanism을 단순화 시키면 그림 6과 같다. 여기서 Spherical Joint는 2개의 상응하는 Revolute Joint (R_{i2}, R_{i3})로 생각할 수 있다. Denavit-Hartenberg Matrix를 구하기 위한 Link parameter 는 표 2와 같다.

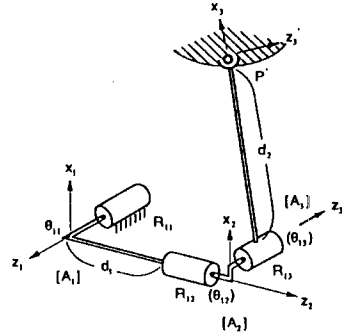


그림 6 모터와 조인트에 설정된 좌표계 ($i=2,4,6$)

Link	Variable	α	a	d
1	θ_{11}	90°	0	0
2	θ_{12}	90°	0	d_1
3	θ_{13}	0	d_2	0

표 2 다관절기구의 Link Parameter($i=2,4,6$)

Transformation Matrix $[A_i]$ 는 표 2의 각각의 파라미터들에 대해서 다음식과 같이 주어진다.

$$[A_i] = \begin{bmatrix} C_{\alpha} & -S_0 C_{\alpha} & S_0 S_{\alpha} & a C_0 \\ S_0 & C_0 C_{\alpha} & -C_0 S_{\alpha} & a S_0 \\ 0 & S_{\alpha} & C_{\alpha} & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

여기에 표 2에서 주어진 Link Parameter들을 적용한 후 $[A_1][A_2][A_3]$ 를 구하면 (2-2)식과 같다.

$$[A_1][A_2][A_3] = \begin{bmatrix} C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} + S_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} & -C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} + S_{\theta_{11}} C_{\theta_{13}} & C_{\theta_{11}} S_{\theta_{12}} \\ S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} - C_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} & -S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} - C_{\theta_{11}} C_{\theta_{13}} & S_{\theta_{11}} S_{\theta_{12}} \\ S_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} & -S_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} & -C_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} + d_2 S_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} + d_1 S_0 C_{\theta_{11}} \\ d_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} - d_2 C_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} - d_1 C_{\theta_{11}} \\ d S_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Motor축에 위치한 좌표계에서 바라본 Spherical Joint의 좌표 (p'_x, p'_y, p'_z) 는 다음식과 같이 계산된다.

$$[A_1][A_2][A_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

이 식을 정리하면,

$$\begin{aligned} p'_x &= d_2 C_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} + d_2 S_{\theta_1} S_{\theta_3} + d_1 S_{\theta_1} \\ p'_y &= d_2 S_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} - d_2 C_{\theta_1} S_{\theta_3} - d_1 C_{\theta_1} \\ p'_z &= d_2 S_{\theta_1} C_{\theta_3} \end{aligned} \quad (2-4)$$

와 같은 관계식이 얻어진다.

여기서, (p'_x, p'_y, p'_z) 는 Task가 주어질 경우, 알 수 있는 값이 되고 θ_{ik} ($i=1\sim 6, k=1\sim 3$)의 값들이 식 (2-4)로부터 구해져야만 된다 (Inverse Kinematic Problem). 결과적으로 이 식은 본 연구에서 제안한 Parallel mechanism의 Forward와 Inverse Kinematics를 동시에 서술한 것이라 할 수 있다.

앞절에서 언급하였듯이, 병렬 다관절 구조를 가진 기구의 Forward Kinematics는 수동적으로 움직이는 Joint (S-joint)의 변위각을 알 수 없는 문제로 인해 해석적으로 접근하기가 매우 힘든것을 확인할 수 있다. Inverse Kinematics는 Forward Kinematics에 비해 상대적으로 쉽게 구해 질 수 있으나 Parallel Manipulator의 Link, Joint구조에 따라 각기 다르게 해를 구하는 방법론을 사용하여야 한다.[13]-[15]

본 연구에서 제안한 Mechanism의 Inverse Kinematics를 푸는 과정을 설명하면 다음과 같다.

우선 수동변위각인 θ_{12}, θ_{13} 를 소거하여 θ_{11} 과 p'_x, p'_y, p'_z 의 관계식을 구하도록 한다.

$$C_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} + S_{\theta_1} S_{\theta_3} = \frac{1}{d_2} (p'_x - d_1 S_{\theta_1}) = a_1 \quad (2-5)$$

$$S_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} - C_{\theta_1} S_{\theta_3} = \frac{1}{d_2} (p'_y + d_1 C_{\theta_1}) = a_2 \quad (2-6)$$

$$S_{\theta_1} C_{\theta_3} = \frac{p'_z}{d_2} = a_3 \quad (2-7)$$

$$C_{\theta_2} C_{\theta_3} = x_1, \quad S_{\theta_3} = x_2$$

라 치환 하면 (이들 치환변수중 a_3 만 이미 알고 있는 값이다.) (2-5),(2-6)식에서

$$C_{\theta_1} x_1 + S_{\theta_1} x_2 = a_1 \quad (2-8)$$

$$S_{\theta_1} x_1 - C_{\theta_1} x_2 = a_2 \quad (2-9)$$

이들 x_1 과 x_2 에 대해서 풀고 (2-7)식을 적용한 후 $S_{\theta_{11}}^2 + C_{\theta_{11}}^2 = 1$

및 $S_{\theta_3}^2 + C_{\theta_3}^2 = 1$ 의 성질을 이용하면

$$C_{\theta_{11}}^2 = x_1^2 + a_3^2 \quad (2-10)$$

$$x_1^2 + x_2^2 + a_3^2 = 1 \quad (2-11)$$

가 되고, 다시 정리한후 새로운 변수로 치환하면,

$$x_1^2 + x_2^2 = 1 - a_3^2 = x_3$$

여기서 x_3 는 a_3 로 인해 아는 값이된다. 이를 치환전의 변수들로서 다시쓰면,

$$a_1^2 C_{\theta_{11}}^2 + 2a_1 a_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{11}} + a_2^2 S_{\theta_{11}}^2 + a_1^2 S_{\theta_{11}}^2 - 2a_1 a_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{11}} + a_2^2 C_{\theta_{11}}^2 = x_3$$

$$\therefore a_1^2 + a_2^2 = x_3 \quad (2-12)$$

(2-12)식에 (2-5) 및 (2-6)의 관계를 적용하여 정리하면

$$p_x'^2 + p_y'^2 + d_1^2 - 2d_1(p'_x S_{\theta_{11}} - p'_y C_{\theta_{11}}) = x_3 d_1^2 \quad (2-13)$$

$$\text{따라서 } p'_x S_{\theta_{11}} - p'_y C_{\theta_{11}} = \frac{p_x'^2 + p_y'^2 + d_1^2 - x_3 d_1^2}{2d_1}$$

$$= \frac{p_x'^2 + p_y'^2 + p_z'^2 + d_1^2 - d_2^2}{2d_1} = x_4 \left(x_3 = 1 - a_3^2 = 1 - \frac{p_z'^2}{d_2^2} \right)$$

라 하면 x_4 는 알 수 있는 값이된다. 삼각함수함수후 θ_{11} 에 대해 풀면

$$\theta_{11} = \text{Sin}^{-1}(x_5) - \omega \quad (2-14)$$

$$\text{단, } x_5 = \frac{x_4}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}}, \quad \tan \omega = -\frac{p'_y}{p'_x}$$

1,3,5번째 Motor의 Link, Joint구조의 Link파라미터들은 표3과 같다.

Link	Variable	α	a	d
1	θ_{11}	-90°	0	0
2	θ_{12}	90°	0	d_1
3	θ_{13}	0	d_2	0

표 3 다관절기구의 Link Parameter ($i=1,3,5$)

이 때는 $[A_1]$ 만 다음식과 같이 변하고 $[A_2], [A_3]$ 는 변화하지 않는다.

이들 모터들에 대한 $[A_1][A_2][A_3]$ 를 계산하면 다음과같이 된다.

$$[A_1][A_2][A_3] =$$

$$\begin{bmatrix} C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} - S_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} & -C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} - S_{\theta_{11}} C_{\theta_{13}} & C_{\theta_{11}} S_{\theta_{12}} \\ S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} + C_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} & -S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} + C_{\theta_{11}} C_{\theta_{13}} & S_{\theta_{11}} S_{\theta_{12}} \\ -S_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} & S_{\theta_{12}} S_{\theta_{13}} & C_{\theta_{12}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} - d_2 S_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} + d_1 S_{\theta_{11}} \\ d_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} + d_2 C_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} - d_1 C_{\theta_{11}} \\ -d S_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

이들 Motor Joint에 대한 Kinematics는 앞에서의 방법을 그대로 적용하면,

$$p'_x = d_2 C_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} - d_2 S_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} - d_1 S_{\theta_{11}}$$

$$p'_y = d_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{12}} C_{\theta_{13}} + d_2 C_{\theta_{11}} S_{\theta_{13}} + d_1 C_{\theta_{11}} \quad (2-16)$$

$$p'_z = -d_2 S_{\theta_{11}} C_{\theta_{13}}$$

가 되고 Motor Joint 각도는 앞에서의 방법과 유사한 과정을 밟으면 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_{11} = \text{Sin}^{-1}(x'_3) - \omega \quad (2-17)$$

$$\text{단, } x'_3 = \frac{x'_4}{\sqrt{p_x'^2 + p_y'^2}}, \quad x'_4 = \frac{-(p_x'^2 + p_y'^2 + p_z'^2) - d_1^2 + d_2^2}{2d_1}$$

즉 2,4,6번째 Motor에서의 경우와 부호가 반대가 됨을 알 수 있다.

이제 앞에서 주어진 식 (2-14),(2-15)의 결과를 이용하기 위해서는 Parallel Manipulator의 베이스 plate 중심좌표계와 Moving plate 중심좌표계간의 Transformation Matrix를 알아야 한다. 베이스 plate 및 Moving plate에 설정한 중심좌표계와 각 Motor 축의 좌표계는 그림 7과 같다.

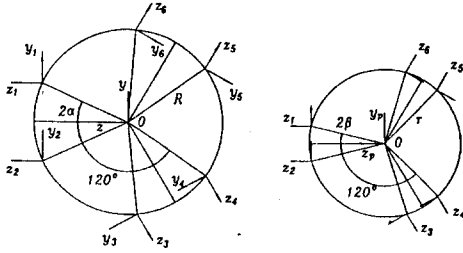


그림 7 Base, Moving plate에 설정된 좌표계

여기서 R은 베이스 plate 중심에서 Motor축간의 거리이고 α는 인접한 두 Motor축간의 각도이다. 베이스 중심좌표계에 대한 각 Motor축 좌표계의 Transformation Matrix는 다음과 같이 구해진다.

$$[F_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & RS_\alpha \\ 0 & 0 & 1 & RC_\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[F_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -RS_\alpha \\ 0 & 0 & 1 & RC_\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[F_6] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{120^\circ} & S_{120^\circ} & RC_{30^\circ-\alpha} \\ 0 & -S_{120^\circ} & C_{120^\circ} & -RS_{30^\circ-\alpha} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이들은 기하학적인 파라미터로 이루어져 있기 때문에 일단 구조설계가 되면 일정한 값을 가지게된다. 그림 7의 Moving plate에 설정된 중심좌표계와 6개의 Spherical Joint중심의 좌표계에 대한 Transformation Matrix는 베이스 plate에서와 마찬가지로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[f_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & rS_\beta \\ 0 & 0 & 1 & rC_\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[f_6] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{120^\circ} & S_{120^\circ} & rC_{30^\circ-\beta} \\ 0 & -S_{120^\circ} & C_{120^\circ} & -rS_{30^\circ-\beta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Task Coordinate에 대해서 Inverse Kinematics를 풀기위해 그림8과 같이 각 Link, Joint간의 Transformation 관계를 생각한다.

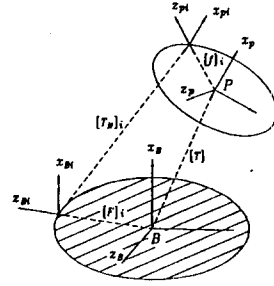


그림 8 Task coordinate

여기서 [T]는 베이스 plate에서 Moving plate에 주어지는 Task Transformation Matrix이고 $[T_M]_i$ 는 i번째 Motor에서 해당 Loop의 Spherical Joint에 도달하는 Transformation Matrix로서 앞의 $[A_1][A_2][A_3]$ 와 같다.

즉 $[T_M]_i$ = Motor Joint에 대해 구해야 하는 변환

[T] = Task로부터 주어지는 변환

$[F_i], [f_i]$ = 베이스plate와 Moving plate의 기하학적관계로

부터 얻어지는 변환이므로 이들의 관계는 다음과 같다.

$$[F_i][T_M]_i = [T][f_i] \quad (2-18)$$

$$\therefore [T_M]_i = [F_i]^{-1}[T][f_i]$$

Task를 Roll, Pitch, Yaw와 Translation으로 주는 경우를 생각하면,

$$[T] = \text{Trans}(x_p, y_p, z_p) RPY(\phi, \theta, \varphi) \quad (2-19)$$

이 되고 Motor1에 대해 예를 들어서 Inverse Kinematics를 풀면,

$$[F_1]^{-1}[T][f_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & rS_\alpha \\ 0 & 0 & 1 & rC_\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & rS_\beta \\ 0 & 0 & 1 & rC_\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

$$\begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\varphi - S_\phi C_\varphi & C_\phi S_\theta C_\varphi + S_\phi S_\varphi & x_p + rS_\beta C_\phi + \dots + rC_\beta C_\varphi \dots + \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\varphi + C_\phi C_\varphi & S_\phi S_\theta C_\varphi - C_\phi S_\varphi & y_p - rS_\alpha + rS_\beta S_\phi + \dots + rC_\beta S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\varphi & C_\theta C_\varphi & z_p - rC_\alpha + rS_\beta C_\theta S_\varphi + rC_\beta C_\theta C_\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

그러므로 식(2-16)의 p'_x, p'_y, p'_z 는 Task에서 주어진 $x_p, y_p, z_p, \phi, \theta, \varphi$ 의 값으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} p'_x &= x_p + rS_\beta C_\phi + \dots + rC_\beta C_\varphi \dots + \\ p'_y &= y_p - rS_\alpha + rS_\beta S_\phi + \dots + rC_\beta S_\phi \\ p'_z &= z_p - rC_\alpha + rS_\beta C_\theta S_\varphi + rC_\beta C_\theta C_\varphi \end{aligned} \quad (2-21)$$

4. 동작영역 해석

앞절에서 서술한 기구학 모델링에 기초하여 본 연구에서 제작한 병렬 다관절 구조 손목기구의 동작영역을 simulation을 통하여 구해 보았다.

일반적으로 6자유도를 갖는 직렬구조 매니플레이터는 그중의 3자유도는 침단부의 위치결정용이고 나머지 3자유도는 서로 한점에서 교차하며 손목부의 자세를 결정하므로 동작영역을 표시하기가 용이한 반면에 병렬구조 매니플레이터의 동작영역을 직선운동(translational motion)과 회전 운동(orientational motion)으로 나누어서 3차원으로 묘사하기는 어려운점이 있다. 본 절에서는 앞에서 2가지 방법으로 얻은 기구학 모델링 결과를 가지고 동작영역을 scanning방법으로 simulation하여보기로 한다.

그림 9는 Denavit-Hartenberg 방법을 이용한 Inverse Kinematics의 해를 이용하여 얻은 결과이다. 실제의 동작영역은 그림에서 볼 때 3차원 평면에 대해 단면이 대략 정삼각형 모양을 갖는데 이는 motor, joint, link의 배열이 120° 간격으로 방사상 대칭구조로 배열되어 있기 때문으로 생각된다. 동작영역을 simulation하는 방법으로는 moving plate가 초기 위치를 갖는 point를 중심으로 충분한 크기의 입체 격자점을 task로 주어 단지 translation만 일어나고 어느방향으로든지의 tilting (또는 roll, pitch, yaw)은 발생하지 않는 것으로 하였다.

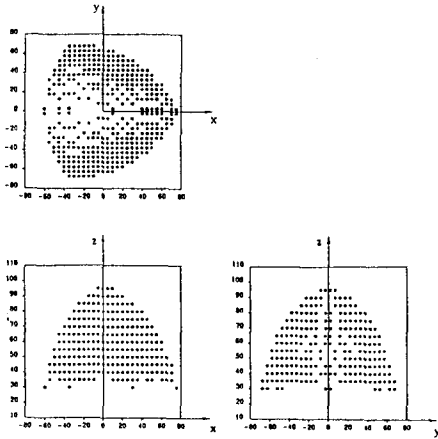


그림 9 동작영역의 simulation결과

5. 결론 및 향후과제

기존의 로봇손목기구에 범용자유도를 부가 할 수 있는 병렬 다관절 구조의 손목기구를 개발하고 그에 대한 역기구학의 해를 구하였다. 새로 설계한 6자유도를 가진 병렬다관절 구조 로봇손목기구는 기존의 다른 병렬다관절구조 매니플레이터의 경우보다 비교적 간단한 역기구학 해를 가지고 있음을 알 수 있다.

동작영역의 시뮬레이션 결과에 의하면 본 연구에서 제안한 PM은 링크의 구조적 특성으로 인해 기존의 다른 PM보다 넓은 동작영역을 가지고 있음을 알 수 있다.

향후 연구과제로서는 다음과 같은 사항을 고려하고 있다.

(1) 개발된 병렬 다관절 구조 손목기구의 위치제어를 실행하기 위한 Path planning에 대한 연구.

(2) 동력학적인 분석

(3) 두 평판간 6자유도 변위측정 시스템의 완성 및 전체 시스템의 제어기 설계

6. 참고 문헌

- [1] H.Makino, N.Furuya,"Selective Compliance Assembly Robot Arm", Proc.,of Int. Conf.on Assembly Automation, Brighton,Mar.1980
- [2] R.S.Ball,"A Treatise on the Theory of Screws,"Cambridge Univ.Press,1900
- [3] D.Stewart,"A platform with 6 D.O.F.,"Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180 (Part 1,15) pp 371-387,1965
- [4] K.H.Hunt,"Kinematic Geometry of Mechanisms", Oxford Univ.Press,1978
- [5] J.Duffy," Analysis of Mechanisms and Robot manipulators," Halsted Press, NY,1980
- [6] D.C.H.Yang and T.W.Lee,"Feasibility Study Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint," ASME J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol.106 pp 191-198,1984
- [7] R.Paul,"Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control," MIT Press,1981
- [8] M.G.Mohamed and J.Duffy," A Direct Determination of the Instantaneous Kinematics of Fully Robot Manipulators,"ASME J of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol.107,pp 226 - 229,1985
- [9] K.Sugimoto, "Kinematics and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra," ASME J. of Mechanisms,Transmissions, and Automation in Design, Vol.109, pp3-7, 1987
- [10] E.F.Fichter,"A Stewart Platform Based Manipulator General Theory and Practical Construction" ,Int..J.of Robotics Research, Vol.5, No 2,1986
- [11] J.P.Merlet,"Singular Configuration of parallel manipulators and grassmann geometry," Int. J.of Robotics Research, Vol.8, No.5, pp 45-56 1990
- [12] T.Arai,"Development of a parallel link manipulator", ICAR, pp 839-844,June,1991
- [13]D.Kohli,S.H.Lee, K.Y.Tsai and G.N.Sandor, "Manipulator Configurations Based on Rotary-Linear(R-L) Actuators and Their Direct and Inverse Kinematics," ASME J. of Mechanisms, Transmissins and Automation in Design, Vol 110, pp 397-404,1988
- [14] F.Pierrot,C.Reynand and A Fournier, "DELTA a simple and efficient parallel robot," Robotica, Vol.8,pp 105-109,1990
- [15] M.Shahinpoor, Kinematics of a Parallel Serial(Hybrid) Manipulator J, of Robotic Systems, Vol.9, No.1,pp17-36,1991
- [16] R. Stoughton and T.Arai," Kinematic Optimization of a Chopstick-type micromanipulator",Proc.of Japan-UAS Symp on Flexible Automation, San Francisco, July, pp151-157,1992
- [17] T.Arai and R.Stoughton, "Micro hand module using parallel link mechanism," Proc.of Japan-USA Symp. on Flexible Automation San Francisco, July, pp.163-168,1992