

<논 문>

새로운 6자유도 병렬 매니플레이터의 기구학 해석

변용규* · 조형석**

(1995년 2월 8일 접수)

Kinematic Analysis of a New Class of 6-DOF Parallel Manipulator

Yong Kyu Byun and Hyung Suck Cho

Key Words : Parallel Manipulator(병렬 매니플레이터), Forward Kinematics(정기구학), Inverse Kinematics(역기구학), Closed-Form Solution(해석해)

Abstract

In this paper, a new kinematic structure of a parallel manipulator with six Cartesian degrees of freedom is proposed. It consists of a platform which is connected to a fixed base by means of 3-PPSP(parameters P, S denote the prismatic, spherical joints) subchains. Each subchain has a link which is connected to a passive prismatic joint at the one end and a passive spherical joint at the other. The spherical joint is then attached to perpendicularly arranged prismatic actuators which are fixed at the base. This arrangement provides a basis to control all six Cartesian degrees of motion of the platform in space. Due to its efficient architecture, the closed-form solutions of the inverse and forward kinematics can be obtained. As a consequence, this new kinematic structure can be servo controlled using simple inverse kinematics because forward kinematics allows for measuring the platform's position and orientation in Cartesian space. Furthermore, the proposed structure provides an effective functional workspace. Series of simulations are performed to verify the results of the kinematics analyses.

1. 서 론

로봇기구에 있어 병렬 메카니즘은 첨단부와 베이스가 2개 이상의 직렬관절에 의해 페루프를 형성하며 서로의 운동을 구속하는 형태로 구성되어 있으므로, 가반하중이 각 조인트에 분산되고 강성, 정밀도, 안정성의 측면에서 유리한 구조를 가진다. 즉, 직렬로봇에 안정성 및 강성 향상을 위하여 병렬 메카니즘을 부분적으로 도입한 많은 산업용 로봇이 개발되어 적용되고 있음이 이를 입증하고 있

다. 이러한 병렬 메카니즘으로 구성된 6자유도 병렬 매니플레이터는 직렬로봇의 동작능력(dexterity)과 공작기계(machine tool)의 강성(rigidity)을 절충한 특징을 가짐으로써 비교적 작은 작업영역에서 다양한 동작과 강성이 요구되는 정밀한 작업에 효과적인 구조적 특성을 지닌다. 그러나 6자유도 병렬 매니플레이터는 제한된 작업영역과 제어측면에서의 고유한 한계점인 정기구학의 실시간해석의 난점으로 인하여 산업적 응용에 있어서 직렬로봇에 비하여 큰 열세를 보이고 있으며, 따라서 이를 극복하려는 많은 시도가 이루어지고 있다.

이러한 시도로서는 완전병렬 매니플레이터(fully parallel manipulator)인 스투어트 플랫폼(stewart platform) 형태의 메카니즘에 관한 연구가 주류를

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

이루고 있으며, 구조적 변수의 최적화를 통한 가반 하중과 동작능력의 개선,⁽¹⁾ 구동부의 형태변형에 의한 작업영역 및 동적특성의 향상,⁽²⁾ 실제 제작시 발생하는 조립오차의 기구학적 보상⁽³⁾ 등과 관련한 연구가 행하여 졌다. 또한 제어측면에서의 한계점을 극복하기 위해서 정기구학의 해석에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 즉, 첨단부와 베이스의 임의의 위치에 길이가 가변되고 양단에 구형조인트가 형성된 6개의 직렬관절이 결합된 경우에 대해 Griffis,⁽⁴⁾ Innocenti,⁽⁵⁾ Fitzgerald⁽⁶⁾는 16차의 비선형 방정식으로 정리되는 정기구학을 수치해석법(Newton-Raphson method)으로 계산하여 640개의 해가 존재함을 보였고, Nanua,⁽⁷⁾ Raghavan⁽⁸⁾은 첨단부와 베이스가 평면인 경우 40개의 해가 존재하며, Merlet,⁽⁹⁾ Shi,⁽¹⁰⁾ Lee⁽¹¹⁾는 직렬관절이 첨단부와 베이스평면상에서 정육각형 꼭지점에 연결되어 있을 경우 16개의 해가 존재함을 보였다. 또한 Geng,⁽¹²⁾ Yee⁽¹³⁾는 신경망 이론을 적용하여 근사해를 구하였다.

또 다른 시도로서는 새로운 개념의 6자유도 병렬 매니플레이터의 도입이다. Behi⁽¹⁴⁾는 3-PRPS 관절을 가진 병렬 매니플레이터를 제안하고 정기구학 해석을 통하여 3개의 미지수를 가진 3개의 비선형 방정식으로부터 수치해석법에 의해 8개의 독립적인 해가 얻어짐을 보였고, Tesar⁽¹⁵⁾는 로봇 손목기구에 적용 가능한 4개의 입력관절을 가진 마이크로 매니플레이터를 제안하고 스튜어트 플랫폼의 경우와 유사한 정기구학해를 얻었으며, Tsai⁽¹⁶⁾는 팬토그래프(pantograph) 형태의 2자유도 구동장치를 가졌으며 최대 16개의 정기구학해가 존재하는 9개의 미지수를 가진 8차 다항식으로 해석되는 복합 직/병렬 매니플레이터 메카니즘을 개발하였다. Sorli⁽¹⁷⁾는 3개의 관절형 다중 평행사변형형태의 구동장치를 적용하고 작업영역 평가에 의해 메카니즘의 유용성을 보였으며, Alizade⁽¹⁸⁾는 3개의 SP링크와 원형레일 위를 움직이는 구동장치에 의하여 수직방향으로 자유로운 회전이 가능하며 9개의 비선형 방정식으로부터 11개의 정기구학해가 존재하는 병렬 매니플레이터의 장점을 작업영역면에서 부각시켰다. Kohli⁽¹⁹⁾는 R-L 구동장치에 의한 다양한 조합이 가능하며 16차 다항식으로부터 32개 정기구학해가 얻어지는 메카니즘을 제안하였고, Cleary⁽²⁰⁾는 모든 연결부를 회전조인트로 설계한 새로운 형태의 병렬 매니플레이터를 제안하고 3개의 미지

수를 가진 3개의 비선형 방정식을 수치해석법을 사용하여 시뮬레이션한 결과, 수렴속도가 실시간 해에 접근함을 보였다. 또한 Parenti-Castelli⁽²¹⁾는 스튜어트 플랫폼 메카니즘을 기본으로 하는 RRR-3S, PRR-3S, PPP-3S 메카니즘을 제안하고, 이중 PRR-3S, PPR-3S 형태에 대한 정기구학 해석을 통하여 각각 한개의 미지수를 가진 16차와 12차 다항식(polynomial equation)으로 정리되는 해석해(closed form solution)를 구하였다.

이러한 상기에서 열거한 6자유도 병렬 매니플레이터는 적용분야에 따라 구조와 기능 면에서 적합한 특징과 장점을 지니나 구동입력으로부터 첨단부의 위치/자세를 알기 위한 정기구학이 복잡한 계산과 긴 시간을 필요로 하는 한계점을 가진다. 즉, 부가적인 6자유도 위치/자세 측정장치의 의존 없이는 카테시안 공간상에서 첨단부의 위치/자세를 실시간으로 측정하여야 하는 역기구학을 사용한 서보제어가 불가능하다. 따라서 실제적인 6자유도 병렬 매니플레이터의 첨단부 위치/자세측정에 있어서 각종 센싱시스템 부가에 의존한 실시간 동작제어 방안⁽²²⁻²⁴⁾이 연구되었으나 6축 절대 위치/자세 측정장치로서 측정오차의 누적이나 공간적인 제약, 배치의 난점 등의 한계를 가진다.

기존의 스튜어트 플랫폼 형태의 병렬 매니플레이터는 회전각이 고정된 자세에서 속이 전부 차지않은 반구형태(hemispherical)의 병진작업영역을 가진다. 이러한 작업영역의 개선을 위하여 직렬형 부속관절의 배치를 변경함으로써 수직방향의 작업영역을 향상시켰으나 높이에 따른 단면형태가 상당한 차이를 보이며 작업영역을 크게하기 위하여 구동부를 회전형 구동부로 하고 링크를 하나 부가한 변형된 형태이나 가반하중이 상당히 취약해지는 단점이 있다. 이외에 기존의 대부분의 병렬 매니플레이터도 높이(altitude)에 따라 모양과 크기가 다른 반구형태 한 형태나 다각형형태의 작업영역을 가진다.

또한 기존의 병렬 매니플레이터는 첨단부와 직렬형 부속관절이 3개의 회전형 조인트가 한점에서 작용하는 형태의 구형조인트나 2개의 회전형 조인트가 한점에서 작용하는 형태의 유니버설 조인트로 연결되는 경우가 대부분이다. 이 경우 각 직렬형 부속관절은 첨단부에 대하여 순수한 축방향의 힘이 작용하게 되며 연결부가 구형조인트로 이루어진 경우 Tsai는 축방향의 힘과 회전축 방향에 직각으로

작용하는 모멘트가 복합적으로 첨단부에 작용하게 된다. 또한 기존의 대부분의 병렬 매니플레이터는 베이스와 첨단부가 연직상방으로 임의의 위치 떨어져 있으며 이 사이를 직렬형 부속관절이 폐회로를 형성하고 있다. 즉, 모든 직렬형 부속관절은 첨단부에 대하여 수직에 가까운 방향으로 배치되며 이로 인하여 첨단부는 연직에 가까운 방향으로 첨단부의 외력을 지지하게 된다. 따라서 수직방향의 힘과 수평축방향의 모멘트는 상당히 크게 된다. 반면 수평방향의 힘과 수직축방향의 모멘트는 제한되는 면이 있다.

본 연구에서는 6자유도 병렬 매니플레이터의 구성에 있어서 각 요소의 조합을 분석하고, 능동조인트와 수동조인트의 배치에 따른 첨단부의 위치/자세 계산을 위한 기구학적 구속조건을 고려하여 정기구학의 해석해가 얻어지는 3-PPSP 형태의 6자유도 병렬 매니플레이터를 제안하고자 한다. 또한 각 구성요소간의 상호구속조건 및 자유도에 따른 수학적 모델을 수립하고, 기구학해석 및 검증을 통하여 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터의 설계변수 최적화에 요구되어지는 동작특성 및 병진/회전 작업영역해석, 입출력 힘/모멘트분석을 위한 기초를 제시하고자 한다.

본 논문의 구성을 보면 제2장에서는 기구의 기본 개념과 메카니즘의 구성에 대해 기술하고, 자유도 해석을 통하여 본 연구의 메카니즘이 6자유도 병렬 매니플레이터의 조건을 만족함을 보였으며, 제3장에서는 기구학 모델링을 바탕으로 역기구학을 해석하고자 한다. 그리고 제4장에서는 상기의 기구학적 구속조건에 의해 정기구학의 해석해가 구해짐을 기술하며, 제5장에서는 이들 결과를 이용한 시뮬레이션을 통하여 정, 역기구학을 검증하기로 한다. 그리고 마지막으로 제6장에서는 이들에 대한 검토 및 결론을 기술하고자 한다.

2. 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터

2.1 기구의 기본 개념

6자유도 로봇 매니플레이터의 기구학적인 설계는 첨단부와 베이스가 6개의 직렬관절로 병렬연결된 완전병렬 매니플레이터와, 각 관절이 연쇄적인 개회로(open-loop)형태의 구조로 직렬연결된 직렬로봇의 범위 내에서 이루어진다. 직렬로봇은 모든 조인트가 능동적으로 구동되어야 하나, 병렬 매니

플레이터는 능동, 수동 조인트의 조합에 의해 여러 가지 특성을 가진 메카니즘의 구현이 가능하다. 즉, 첨단부와 베이스의 형태 및 그 사이를 병렬 연결하는 관절의 수와 기하학적 형태, 능동조인트와 수동조인트의 종류, 분포에 제한이 없으므로 목적하는 성능 및 조건에 적합한 병렬 매니플레이터의 설계가 가능하다. 이때 각 직렬관절이 가진 조인트의 개별자유도는 6자유도이며, 완전병렬 매니플레이터는 모두 36개, 직렬로봇은 6개의 개별자유도를 가진 조인트로 이루어진다.

또한 6자유도 로봇 매니플레이터는 최소한 6개의 능동조인트를 가져야 한다. 따라서 완전병렬 매니플레이터의 직렬관절은 5개의 수동조인트와 1개의 능동조인트의 조합으로 이루어졌으며, 직렬로봇의 연쇄적인 관절은 모두 능동조인트로 구성된다. 여기서 각 관절의 능동조인트는 첨단부의 위치/자세를 제어하기 위한 입력이다. 직렬로봇의 경우 능동조인트의 변위인 구동입력으로부터 첨단부의 위치/자세가 쉽게 계산된다. 그러나 완전병렬 매니플레이터는 각각 1개의 능동조인트 구동입력과 5개의 수동조인트를 가진 6개의 직렬관절의 상호구속작용에 의하여 첨단부의 위치/자세가 결정되며, 이로 인하여 첨단부 위치/자세의 계산이 매우 복잡해지고 수학적으로 여러 개의 해를 가지게 된다. 따라서 직렬관절의 수가 적을수록 정기구학의 해석이 상대적으로 용이해지며, 직렬관절 간의 상호구속을 줄일 수 있으므로 동작능력이 향상된다. 여기서 동작영역과 하중분포의 대칭성을 고려하여 각 직렬관절은 같은 형태의 구성을 가지게 됨으로, 또 다른 효율적인 구조로는 첨단부와 베이스가 각각 2개의 능동조인트와 4개의 수동조인트를 가진 3개의 직렬관절로 연결되는 6자유도 병렬 매니플레이터이다.

한편 기존의 6자유도 병렬 매니플레이터는 대체적으로 첨단부와 직렬관절이 구형조인트에 의하여 연결됨으로 축방향 이외의 하중에 대하여 취약한 특성을 나타낸다. 또한 첨단부와 직렬관절의 연결부간의 상대운동이 3개의 수동자유도를 가지며, 연결부 회전중심의 위치를 구동입력으로부터 직접적으로 구할 수가 없으므로 첨단부의 위치/자세 계산을 위하여 여러 기구학적 조건이 부가되어야 한다.

본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터는 직렬관절(serial subchain)의 수를 3개로 하였다. 각 직렬관절은 2개의 능동조인트(active joint)와 4개의 수동조인트(passive joint)로 구성되며 능동조인트는

서로 직접 연결되어 있다. 또한 첨단부와 세 직렬 관절을 한 평면상에서 각각 1개의 수동조인트로 연결하고, 나머지 수동조인트의 작용점을 구동부와 직접 연결함으로써, 구동입력으로부터 연결부의 위치인 3개의 수동조인트의 작용점이 직접 결정된다. 따라서 첨단부와 직접적인 위치관계를 알 수 있는 중복되지 않는 각 수동조인트의 작용점인 공간상의 세점의 위치정보에 의하여 첨단부의 자세 계산이 가능하다. 즉, 첨단부의 자세는 상기 세점을 포함하는 유일한 평면과 같은 자세를 갖는다. 이에 부가하여 첨단부를 연결하는 수동조인트의 운동을 첨단부에 대하여 한 평면상에서 일정방향으로 서로 구속함으로써 능동조인트의 변위로부터 첨단부의 위치를 유일(unique)하게 계산해 내기 위한 조건을 가지는 메카니즘을 구성하였다.

또한 작업영역의 대칭성과 가반하중의 균등한 분포를 고려한 6자유도 병렬 매니플레이터의 설계를 고려하였다.

2.2 구조 및 배치

본 연구의 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터 프로토타입(prototype)설계의 일예를 Fig. 1에 도시하였다. 수직/수평 선형구동부(vertical/horizontal prismatic actuator)는 임의의 형태를 가진 베이스

상에 고정되어 있으며, 중앙에 도시한 정6각 기둥은 3개의 선형조인트(prismatic joint)운동방향의 교차점인 첨단부중심이 갖는 병진작업영역(translational workspace)을 나타낸다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 개념적 설계 예로 도시한 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터의 구성요소인 각 링크와 조인트의 조합에 따른 평면도 및 병진작업 영역, 기구학모델(kinematic model)을 개략적으로 나타내었다. 전체구성은 첨단부와 베이스 및 그 사이를 병렬 연결하는 동일한 형태를 가진 3개의 직렬관절로 이루어져 있다. 직렬관절은 수평 선형구동부(P)와 수직 선형구동부(P) 및 그 양단에 각각 구형조인트(S)와 선형조인트(P)가 형성된 링크로 구성된다. 각 직렬관절의 링크는 한 평면상에서 $2\pi/3(\text{rad.})$ 간격으로 반경방향을 따라 첨단부와 선형조인트를 형성하고 있으며, 3개의 선형조인트의 운동방향을 따른 연장선은 한점에서 교차한다. 이 링크 반대쪽 끝단에는 구형조인트가 평면운동을 발생시키는 수직/수평 선형구동부와 직접 접촉되어 있으며, 수직/수평 선형구동부는 베이스의 중심으로부터 일정거리에 $2\pi/3(\text{rad.})$ 간격으로 배치되어있다. 따라서 각 구형조인트의 회전중심은 6자유도병렬 매니플레이터의 구동입력인 수직 선형구동부와 수평 선형구동부의 변위에 따라 각각의 최

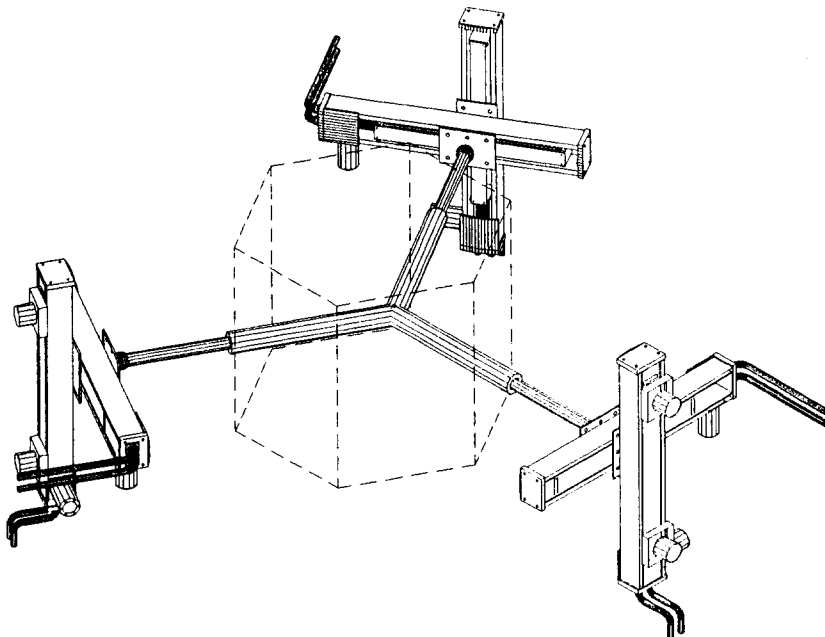


Fig. 1 Prototype design example of the 3-PPSP 6 DOF parallel manipulator (perspective view)

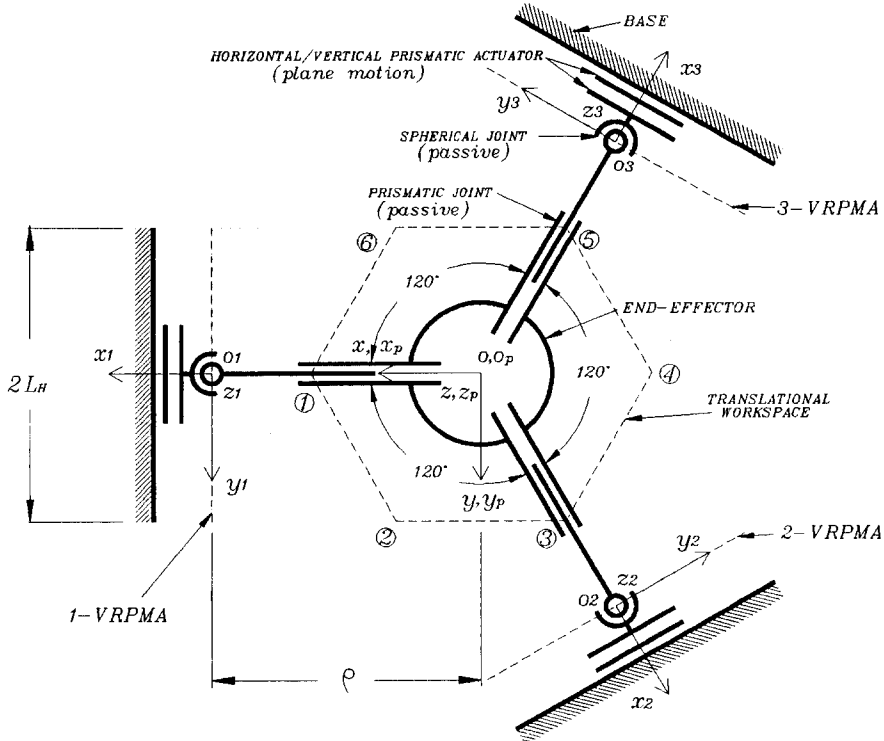


Fig. 2 Kinematic model (plane view)

대 선형변위($2L_v, 2L_H$)를 한 변으로 하는 베이스에 수직인 사각평면 운동영역 (vertical rectangular plane motion area : VRPMA) 상을 이동하게 된다. 여기서, 사각평면 운동영역은 베이스의 중심축으로부터 일정거리에 연직하게 형성되며, 각 사각평면 운동영역의 중심으로부터의 법선들은 베이스 중심에서 연직하게 세운 좌표축상의 한 점에서 좌표축과 직각으로 교차하며, 각 법선 간의 교차 각도는 $2\pi/3$ (rad.)가 된다. 따라서 6개의 수직/수평 선형구동부 입력에 의해 구형조인트가 사각평면 운동영역 상에서의 위치변화를 가지면, 첨단부와 직렬관절의 접속부인 선형조인트 및 구형조인트 간의 수동적인 상호구속조건에 따라 첨단부의 6자유도 위치/자세가 결정된다.

2.3 자유도 해석

새로운 기계적 구조물을 설계함에 있어서 첫 단계는 구조물이 목적하는 운동능력(mobility)을 가지고 있는지를 증명하는 것이다. 6자유도 병렬 매니플레이터는 구동입력이 능동적일 경우 카테시안 좌표계 상의 6자유도를 가지며, 고정되어 있을 경

우 정적 구조물의 형태를 가져야 한다.

본 연구에서 제안한 메카니즘이 상기의 조건을 만족한 설계임을 다음의 일반적인 공간구조물의 자유도 해석 방정식⁽²⁵⁾에 의해 증명할 수 있다. m 은 정적부위에 대하여 운동부위가 가능한 동작영역내에서 임의의 위치와 자세를 가질수있는 독립적인 변수의 수로서 공간구조물의 자유도이다.

$$m = d(n - g - 1) + \sum_{j=1}^g f_j \quad (1)$$

여기서, d 는 평면 운동기구일 경우 3, 공간 운동기구일 경우 6, n 은 베이스를 포함한 링크 수, g 는 조인트 수이고, f_j 는 j 번째 조인트의 개별자유도이다.

본 연구에서 제안한 병렬 매니플레이터는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 11개의 링크($n=11$: 첨단부 1, 링크 3, 수평 선형구동부 3, 수직 선형구동부 3, 베이스 1로 구성되며 각 직렬관절은 4개의 조인트(선형조인트, 구형조인트, 수평 선형구동부 능동조인트, 수직 선형구동부 능동조인트)로 이루어진 3차원 공간운동기구이므로 $d=6, g=12$ 이다. 구동

입력이 능동적일 경우 12개의 조인트는 18개의 개별자유도 ($\sum_{j=1}^8 f_j$: 18은 선형조인트 9×1, 구형조인트 3×3)를 가진다. 상기의 값들을 식 (1)에 대입하면 본 병렬 매니플레이터의 자유도는

$$m_{active} = 6(11 - 12 - 1) + 18 - 0 = 6 \quad (2)$$

그러나, 구동부가 모두 고정되어 있으면 12개의 조인트의 개별자유도는 12개로 감소하며 ($\sum_{j=1}^8 f_j = 12$: 선형조인트 3×1, 구형조인트 3×3) 자유도는

$$m_{locked} = 6(11 - 12 - 1) + 12 - 0 = 0 \quad (3)$$

이 됨으로 정적 구조물의 형태를 갖는다.

따라서 상기의 자유도 해석으로부터 본 연구에서 제안된 메카니즘은 6자유도 병렬 매니플레이터의 조건을 만족함을 알 수 있다.

3. 역기구학 해석

3.1 기구학 모델링

본 6자유도 병렬 매니플레이터의 기구학을 해석하기 위한 좌표계를 Fig. 2와 같이 설정하였다. 기준좌표계 (x, y, z) 는 각 사각평면 운동영역 중심 o_i ($i=1\sim3$)로부터 기구중심을 향하여 연속하게 연장된 세 법선 ($\overline{o_1o}$, $\overline{o_2o}$, $\overline{o_3o}$)의 교차점 o 에 위치하며, z 축은 연직상방을 향하고 x 축은 1-수직사각평면 운동영역 법선을 따라 1-수직사각평면 운동영역 중심 o_1 을 향하며, y 축은 카테시안좌표계를 따른다. 구동부좌표계 (x_p, y_p, z_p) 는 각 사각평면 운동영역의 중심 o_i 에 위치하며 수직 능동조인트의 변위 방향인 z_i 축은 사각평면 운동영역을 따라 연직 상방을 향하고, x_i 축은 각 법선의 반대쪽 연장선상을 따라 설치되며, y_i 축은 각 수평 능동조인트의 변위 방향을 향한다. 이때 구형조인트의 회전중심은 수직사각평면 상에서 변위를 가짐으로 x_i 방향의 변위는 없다. 첨단부좌표계 (x_p, y_p, z_p) 는 각 사각평면 운동영역 상의 세 구형조인트의 중심점을 포함하는 유일한 평면인 첨단부평면 상에서 각 선형조인트의 운동방향 ($\overline{o_1o}$, $\overline{o_2o}$, $\overline{o_3o}$)의 교차점 o_p 상에 위치한다. z_p 축은 첨단부 평면에 연직상방을 향하고, x_p 축은 1-구형조인트의 중심을 향하며, y_p 축은 카테시안좌표계를 따른다.

초기 기준상태에서 기준좌표계와 첨단부좌표계는 일치한다. 또한 기준좌표계와 구동부좌표계는 고정되어 있으나, 첨단부좌표계는 사각평면 운동영역 상에서의 구형조인트위치인 구동입력에 따라 병진

Table 1 Translational workspace

Point	x	y	z
①	$\frac{2L_H}{\sqrt{3}}$	0	$-L_V \sim L_V$
②	$\frac{L_H}{\sqrt{3}}$	L_H	$-L_V \sim L_V$
③	$-\frac{L_H}{\sqrt{3}}$	L_H	$-L_V \sim L_V$
④	$-\frac{2L_H}{\sqrt{3}}$	0	$-L_V \sim L_V$
⑤	$-\frac{L_H}{\sqrt{3}}$	$-L_H$	$-L_V \sim L_V$
⑥	$\frac{L_H}{\sqrt{3}}$	$-L_H$	$-L_V \sim L_V$

과 회전을 가진다. 여기서, $2L_{V,H}$ 는 선형구동부의 최대선형변위를 나타내며, ρ 는 기준좌표계에 대한 각 사각평면 운동영역의 중심(o_i)까지의 거리를 나타낸다.

정육각형 형태의 점선부분은 첨단부의 병진작업 영역(translation workspace)의 평면도로서 첨단부의 중심이 자세변위 없이 이동 가능한 영역으로 이동능력(manoeuvrability)의 척도이다. 본 6자유도 병렬 매니플레이터의 병진 작업영역은 기존의 병렬 매니플레이터와는 달리 시뮬레이션에 의하지 않고도 구조적인 고려에 의하여 직관적으로 계산된다. 병진작업영역의 크기는 선형구동부의 최대 선형 변위의 함수이며 체적(volume) $4\sqrt{3}L_H^2L_V$ 인 정육각기둥의 형태를 가진다. Table 1에는 Fig. 2에 나타난 병진 작업영역의 기준좌표계에 대한 각 꼭지점(①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥)의 위치를 나타내었다.

3.2 역기구학

역기구학(inverse kinematics)은 기준좌표계에 대한 첨단부의 위치 $P(x, y, z)$ 와 자세 $R(\alpha: \text{roll}, \beta: \text{pitch}, \gamma: \text{yaw})$ 이 주어졌을 때 수직/수평 선형 구동부의 변위에 의한 구동부좌표계상에서의 구형조인트의 위치($y_i, z_i, i=1\sim3$)를 구하는 것이다.

Fig. 3은 첨단부의 중심 o_p 가 초기 기준위치 o 로부터 임의의 위치와 자세를 가진 상태를 나타내었다. 이 때 P 와 R 은 기준좌표계에 대한 첨단부좌표계의 위치벡터와 자세벡터를 나타내며, P_i 와 R_i 는 기준좌표계에 대한 각 구동부좌표계의 위치벡터

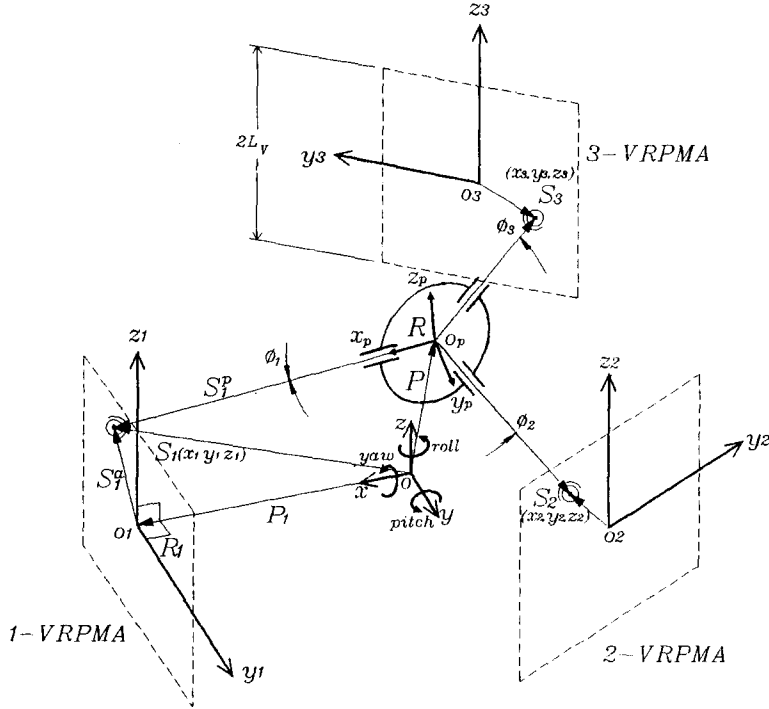


Fig. 3 Inverse kinematics

와 자세벡터를 나타낸다. S_i 는 기준좌표계에 대한, S_i^p 는 첨단부좌표계에 대한, S_i^g 는 구동부좌표계에 대한 구형조인트 중심의 위치벡터를 나타낸다. 기구학적 구속조건에 따라 x 축이 각 법선과 이루는 각 및 x_p 축이 각 선형조인트의 운동방향과 이루는 각을 ϕ_i 라 하면 $\phi_1=0, \phi_2=\frac{2\pi}{3}, \phi_3=\frac{4\pi}{3}$ (rad.)이다.

$\rho_i = \|P_i\|, \rho_i = \|S_i^p\|$ ($\|\cdot\|$: Euclidean norm), $s\phi = \sin(\phi), c\phi = \cos(\phi)$ 라 할 때, 각 벡터의 행렬은 다음과 같이 나타내어진다.

$$P_i = \rho_i \begin{bmatrix} c\phi_i \\ s\phi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_i^p = \rho_i \begin{bmatrix} c\phi_i \\ s\phi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S_i^g = \begin{bmatrix} 0 \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 구형조인트는 평면운동을 함으로 $x_i=0$ 이다.

$$R_i = \begin{bmatrix} c\phi_i & -s\phi_i & 0 \\ s\phi_i & c\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 회전변환행렬을 Euler angle의 roll, pitch, yaw⁽²⁶⁾로 정의하면

$$R = Rot(z, \alpha) Rot(y, \beta) Rot(x, \gamma) \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

각 사각평면 운동영역 상에서 구형조인트가 S_i^g 의 변위를 가지면 이에 따라 첨단부는 P 의 위치변화(translation)와 R 의 자세변화(rotation)를 하게 된다.

이때 기준좌표계에 대한 구형조인트의 위치는 다음의 두 식으로 표현된다.

$$S_i = R_i S_i^g + P_i \quad (9)$$

$$S_i = R S_i^p + P \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터

$$R_i S_i^g + P_i = R S_i^p + P \quad (11)$$

정리하면

$$R_i S_i^e - R S_i^e = P - P_i \quad (12)$$

식 (12)의 각 벡터를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} c\phi_i & -s\phi_i & 0 \\ s\phi_i & c\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi_i \\ s\phi_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \rho \begin{bmatrix} c\phi_i \\ s\phi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)에서 미지수는 수평 선형구동부의 변위 y_i ,

$$\rho_i = \frac{-c\phi_i(x - \rho c\phi_i) - s\phi_i(y - \rho s\phi_i)}{s\phi_i((sac\beta)c\phi_i + (sas\beta\gamma + cac\gamma)s\phi_i) + c\phi_i((cac\beta)c\phi_i + (cas\beta\gamma - sac\gamma)s\phi_i)} \quad (17)$$

수직 선형구동부의 변위

$$y_i = \frac{((sac\beta)c\phi_i + (sas\beta\gamma + cac\gamma)s\phi_i)\rho_i + y - \rho s\phi_i}{c\phi_i} \quad (18)$$

가 구해지며,

식 (16)과 식 (17)로부터 수평 선형구동부의 변위

$$z_i = ((-s\beta)c\phi_i + (c\beta s\gamma)s\phi_i)\rho_i + z \quad (19)$$

가 얻어진다.

따라서 주어진 첨단부의 위치 $P(x, y, z)$ 및 자세 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 로부터 수직/수평 선형구동부의 입력변위, 즉 구형조인트의 위치(y_i, z_i)를 구하는 역기구학의 해석해가 구해진다.

4. 정기구학

정기구학(forward kinematics)은 선형구동부의 입력변위인 각 구형조인트의 위치(y_i, z_i)가 주어졌을 때 기준좌표계에 대한 첨단부의 위치 $P(x, y, z)$ 와 자세 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 를 구하는 것이다.

본 연구의 병렬 매니퓰레이터는 제2장에서 기술한 기구학적인 구속조건에 따라 직렬로봇과 마찬가지로 정기구학의 해석해가 구해진다.

Fig. 2에 나타난 본 6자유도 병렬 매니퓰레이터의 기구학적 구속조건으로부터 미지의 위치인 기준좌표계에 대한 첨단부의 중심위치 P 는 각 구형조

인트의 중심위치벡터 S_1, S_2, S_3 를 포함하는 유일한 평면인 첨단부 평면상에 존재함을 알 수 있다. Fig. 4는 카테시안 공간상에 임의의 위치와 자세를 가지고 있는 S_1, S_2, S_3 와 P 를 포함하는 유일한 평면을 그 면에 수직인 방향, 즉 첨단부좌표계의 z_p 방향을 따라 투영한 그림이다. 첨단부와 3개의 직렬관절을 연결하는 각 선형조인트의 운동방향 ($\overline{S_1P}, \overline{S_2P}, \overline{S_3P}$)은 서로 구속되어 있으며, 이에 따라 $\angle S_1PS_2, \angle S_2PS_3, \angle S_3PS_1$ 은 항상 $2\pi/3$ (rad.)를 이룬다. 여기서 기준좌표계에 대한 구형조인트 중심의 위치벡터 S_1, S_2, S_3 는 구동부 입력변위로부터 식 (9)에 의하여 구해진다. 세 점 S_1, P, S_2 와 S_3, P, S_1 을 지나는 원의 중심을 각각 M 과 N 이라 놓으면, 이 원은 기하학적 성질에 따라 $\overline{S_1S_2}$ 와 $\overline{S_1S_3}$ 를 한 변으로 하는 정삼각형의 외접원과 항상 일치한다. 이때 M 과 N 의 위치는 첨단부 평면상에서 $\overline{S_1S_2}$ 와 $\overline{S_1S_3}$ 의 중점으로부터 수직하게 원의 중심방향으로 $\frac{1}{2\sqrt{3}}\|S_2 - S_1\|, \frac{1}{2\sqrt{3}}\|S_3 - S_1\|$ 의 거리에 위치한다.

식 (13)의 각 행렬요소를 계산하면

$$-s\phi_i \cdot y_i - \rho_i \cdot (cac\beta \cdot c\phi_i + (cas\beta\gamma - sac\gamma) \cdot s\phi_i) = x - \rho \cdot c\phi_i \quad (14)$$

$$c\phi_i \cdot y_i - \rho_i \cdot (sac\beta \cdot c\phi_i + (sas\beta\gamma - cac\gamma) \cdot s\phi_i) = y - \rho \cdot s\phi_i \quad (15)$$

$$z_i - \rho_i \cdot (-s\beta \cdot c\beta_i + (c\beta s\gamma) \cdot s\phi_i) = z \quad (16)$$

식 (14)와 식 (15)로 부터 선형조인트의 수동변위를 나타내는 첨단부중심에서 구형조인트까지의 거리

이를 상기의 관계식으로 나타내면

$$M = \frac{1}{2}(S_1 + S_2)$$

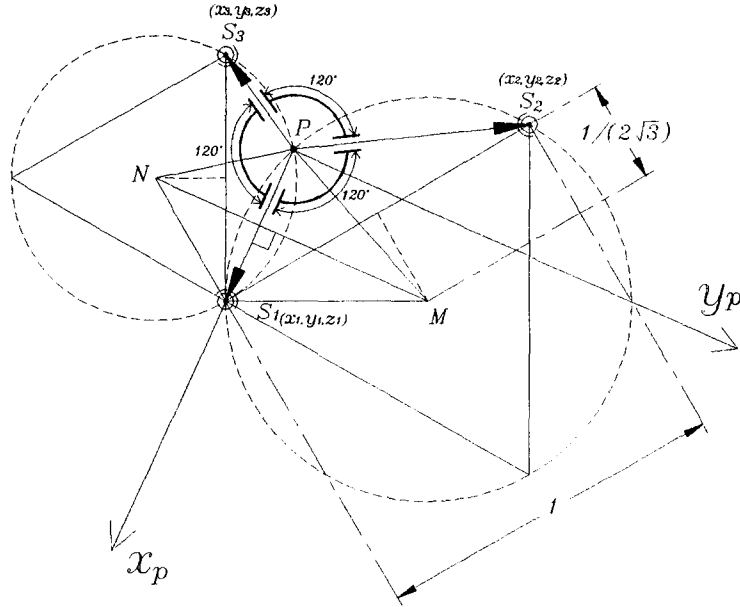


Fig. 4 Forward kinematics

$$+ \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{(S_2 - S_1) \times [(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)]}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|} \quad (20)$$

따라서 식 (20)과 식 (21)로부터 구한

$$N = \frac{1}{2}(S_1 + S_3) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{(S_2 - S_1) \times [(S_3 - S_1) \times (S_3 - S_1)]}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|} \quad (21)$$

따라서 식 (20)과 식 (21)로부터 M과 N을 중심으로 하고 S₁을 지나는 두원의 교점이 첨단부의 중심 P, 즉 첨단부좌표계의 원점이 된다.

이때 각 원의 반경은 $\|S_1 - M\| = \|P - M\|$, $\|S_1 - N\| = \|P - N\|$ 이므로, 첨단부의 중심 P는 S₁으로부터 입사한 \overline{NM} 까지의 수직교차점을 같은 방향으로 2배 연장한 위치가 된다.

$$P = S_1 + 2 \left[(N - S_1) - \frac{(N - S_1)^T (N - M)}{\|N - M\|^2} (N - M) \right] = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (22)$$

첨단부의 자세는 기준좌표계에 대한 첨단부좌표

계의 여현방향의 행렬, 즉 식 (22)에서 구한 기준좌표계에 대한 첨단부좌표계의 원점 P(x, y, z)에서 각 구형조인트의 중심위치 S₁, S₂, S₃ 까지의 여현방향 행렬로 정의된다.

$$R = \begin{bmatrix} \frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|} & \frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|} \\ \frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|} & \frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|} \end{bmatrix} \quad (23)$$

회전변환행렬을 식 (8)과 같이 Euler angle의 roll, pitch, yaw로 정의하면 기준좌표계에 대한 첨단부의 자세인 roll, pitch, yaw, 즉 α, β, γ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(\frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|})_y}{(\frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|})_x} \right) \quad (24)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-(\frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|})_z}{\cos \alpha (\frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|})_x + \sin \alpha (\frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|})_y} \right) \quad (25)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha (\frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|})_x - \cos \alpha (\frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|})_y}{-\sin \alpha (\frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|})_x \times \frac{S_1 - P}{\|S_1 - P\|} - \cos \alpha (\frac{(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)}{\|(S_2 - S_1) \times (S_3 - S_1)\|})_y \times \frac{(S_1 - P)}{\|S_1 - P\|}} \right) \quad (26)$$

이상에서의 정기구학 해석은 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터에 있어서 선형조인트가 한 평면 상에서 운동하며, 운동방향이 첨단부 중심인 한점에서 서로 교차하고, $2\pi/3(\text{rad.})$ 의 상대각을 가질 경우에 대해 정기구학의 해석해가 존재함을 보였다. 따라서 첨단부의 6자유도 위치/자세가 실시간으로 얻어짐으로 본 연구의 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터는 첨단부 변위정보를 입력으로 하는 역기구학을 이용한 서보제어가 가능하다.

5. 기구학의 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터는 각 직렬관절의 능동조인트의 변위에 따라 구형조인트, 선형조인트가 수동적으로 변화하며, 첨단부는 임의의 위치와 자세를 가지게 된다. Fig. 2에 나타난 기구학 모델에 의한 첨단부의 카테시안 공간상에서의 6자유도 운동과 이에 따른 병

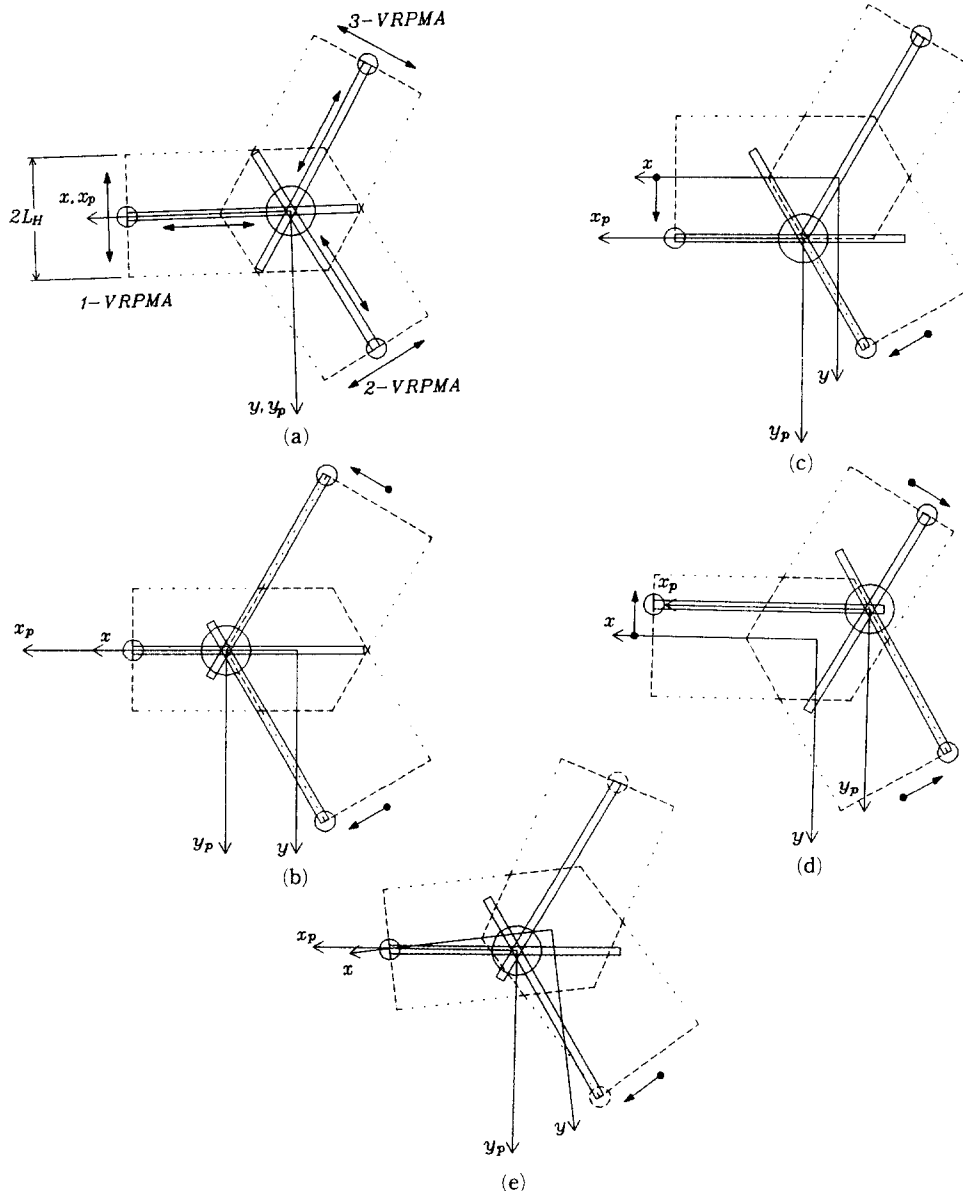


Fig. 5 Configuration w.r. t. each position (plane view)

럴 매니플레이터의 형태변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 도식적구조로 나타내었다.

Fig. 5는 첨단부가 초기기준상태에서 임의의 위치변화를 가졌을 경우를 나타내었다. Fig. 5(a)는 첨단부가 초기기준위치에 있을때의 평면도이다. 이때 기준좌표계 (x, y, z) 와 첨단부좌표계 (x_p, y_p, z_p) 는 일치한다. Fig. 5(b)는 수평 능동조인트가 $y_2 = -L_H, y_3 = L_H$ 의 변위를 가질때 첨단부중심 O_p 가 Fig. 2에 나타낸 작업영역 상의 ①의 위치를 가짐

을 나타낸다. Fig. 5(c)는 수평 능동조인트가 $y_1 = L_H, y_2 = -L_H$ 의 변위를 가지면 첨단부중심 O_p 가 작업영역 상의 ②의 위치를 가짐을 나타낸다. Fig. 5(d)는 첨단부중심 O_p 가 작업영역의 경계상에 위치할때 각 수동 선형조인트의 형태이며, Fig. 5(e)는 초기기준상태에서 한개의 수평 선형구동부만이 변위를 가질때 즉, $y_2 = -L_H$ 의 경우 첨단부중심의 위치와 선형조인트의 형태를 나타낸다.

Fig. 6은 첨단부가 초기기준 상태에서 임의의 자

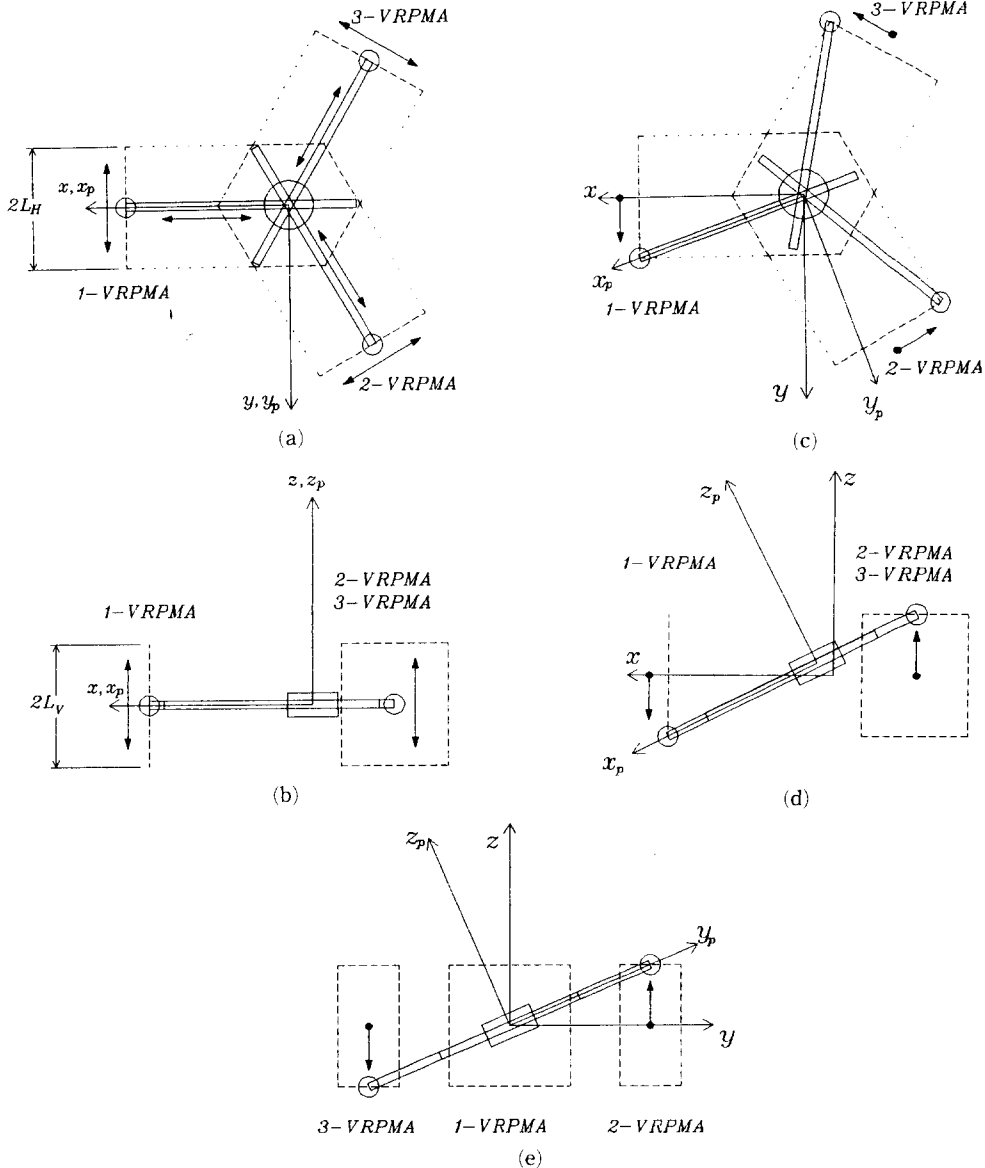


Fig. 6 Configuration w. r. t. roll, pitch, yaw motion

세변화를 가졌을 경우의 형태변화를 나타내었다. Fig. 6(a), Fig. 6(b)는 각각 첨단부가 초기기준상태에 있을때의 평면도와 측면도이다. Fig. 6(c)는 초기기준상태에서 모든 수평 선형구동부가 $y_1=y_2=y_3=L_H$ 의 변위를 가진 경우로써 첨단부가 roll(z 축에 대한 회전)운동을 한 경우이다. Fig. 6(d)는 초기기준상태에서 수직 선형구동부가 $z_1=-L_V, z_2=z_3=L_V$ 의 변위를 가짐으로써 첨단부가 pitch(y 축에 대한 회전)운동을 한 경우이다. Fig. 6(e)는 초기기준상태에서 수직 선형구동부가 $z_2=L_V, z_3=$

$-L_V$ 의 변위를 가짐으로써 첨단부가 yaw(x 축에 대한 회전)운동을 한 경우이다.

상기에서 설명한 각 경우의 조합에 의하여 병렬 매니플레이터의 첨단부는 작업영역 내에서 임의의 6자유도 위치/자세변화가 가능하다. 이러한 동작능력을 가진 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터의 각 구성요소의 기구학적 구속조건과 배치에 따른 수학적 모델링 및 기구학 해석을 검증하고자 역기구학과 정기구학의 시뮬레이션을 수행하였다. 기본 개념에 의한 설계변수의 설정에 있어서 3.1절에서

Table 2 The results of the inverse kinematics analysis for the numerical example

Case	Platform position			Platform orientation(deg.)		
	x	y	z	γ	β	α
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.600000	-0.700000	0.800000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	-2.000000	-37.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	43.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-37.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	37.000000
7	0.200000	0.200000	0.300000	10.000000	15.000000	-17.000000
8	0.300000	-0.400000	0.200000	15.000000	7.000000	-26.000000
9	-0.200000	0.500000	-0.100000	-13.000000	20.000000	-23.000000
10	0.587400	-0.720900	-0.338400	21.236300	-13.087400	-18.829300
	1-Prismatic actuator		2-Prismatic actuator		3-Prismatic actuator	
	(Horizontal)	(Vertical)	(Horizontal)	(Vertical)	(Horizontal)	(Vertical)
	y_1	z_1	y_2	z_2	y_3	z_3
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
2	-0.700000	0.800000	-0.169615	0.800000	0.869615	0.800000
3	-0.994691	0.057718	-0.994155	-0.003875	-0.993336	-0.053809
4	0.000000	0.000000	0.192297	0.976348	-0.192297	-0.976348
5	0.000000	0.994691	-0.121196	-0.418253	0.121196	-0.418253
6	0.994691	0.000000	0.994691	0.000000	0.994691	0.000000
7	-0.142418	-0.013815	-0.714634	0.677818	-0.458736	0.273374
8	-0.897487	0.060657	-0.974348	0.800993	-0.138701	-0.008384
9	-0.145202	-0.701012	-0.371872	-0.110132	-0.977591	0.560092
10	-0.970716	-0.158459	-0.713417	0.113975	0.583720	-0.813249

설명한 좌표계 및 배치를 기준으로 할때 병렬 매니플레이터의 베이스 중심 o 에서부터 구동부 중심 o_i 까지의 거리는 $\rho=1.32L$ 로 하였으며, 6개의 선형구동부의 변위와 첨단부의 변위는 선형구동부의 최대선형변위 $2L_{v,H}$ 로 정규화(normalize)하였다.

5.1 역기구학 시뮬레이션

Table 2은 기준좌표계에 대한 첨단부 위치/자세 정보($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$)가 주어졌을 때, 구동입력인 각 선형구동부의 변위($y_1, z_1, y_2, z_2, y_3, z_3$)가 역기구학의 시뮬레이션에 의하여 구해짐을 나타내고 있다. 즉, 첨단부의 목표제적인 기준좌표계에 대한 첨단부중심점 o_p 의 위치벡터 x, y, z 와 회전변환행렬의 각 요소 Yaw, Pitch, Roll이 주어지면 식 (17)에 의하여 선형조인트의 수동변위에 따른 첨단부중심에서부터 구형조인트 중심까지의 거리 ρ_i 가 구해지며, 이로부터 3.2절의 역기구학 해석결과인 식 (18)와 식 (19)에 의하여 각각 구동입력인 수평 선형구동부 변위(y_1, y_2, y_3)와 수직 선형구동부 변위(z_1, z_2, z_3)가 구해진다.

Case 1은 첨단부가 초기 기준위치 즉, Fig. 3의 기준좌표계와 첨단부좌표계가 일치하여 있을 때 6개의 선형구동부의 변위가 기준위치임을 나타낸다. Case 2는 첨단부중심 o_p 가 기준좌표계중심 o 에 대

하여 자세변위없이 P 의 위치변위만을 가졌을 때의 선형구동부의 입력변위를 나타내며, Case 3은 첨단부중심 o_p 가 기준좌표계중심 o 에 일치하고 R 의 자세변위만을 가졌을 때의 선형구동부의 입력변위를 나타낸다. Case 4~6은 첨단부가 각각 임의의 roll(z 축에 대한 회전), pitch(y 축에 대한 회전), yaw(x 축에 대한 회전)의 자세변위를 가지기 위한 선형구동부의 입력변위를 구한 결과이다. Case 7~10은 첨단부가 임의의 위치와 자세의 목표제적 을 가질 때 6개의 선형구동부의 입력변위를 역기구학 해로부터 구한 결과이다.

6개의 선형구동부는 $-1 \sim 1$ 즉, $-L_{v,H} \sim L_{v,H}$ 까지의 변위가 가능하며 첨단부의 변위에 따른 선형구동부의 최대변위가 $\max(|y_1|, |z_1|, |y_2|, |z_2|, |y_3|, |z_3|)=1$ 인 경우가 첨단부의 최대 병진/회전 작업영역이 된다. Fig. 7에는 시뮬레이션의 각 Case에 있어서의 첨단부중심의 위치/자세를 작업영역내에 나타내었다.

5.2 정기구학 시뮬레이션

Table 3은 5.1절의 역기구학의 시뮬레이션에 의해 구해진 Table 1의 선형구동부의 변위($y_1, z_1, y_2, z_2, y_3, z_3$)를 입력으로 하여 첨단부 위치/자세정보($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$)를 구하는 정기구학의 시뮬레이션

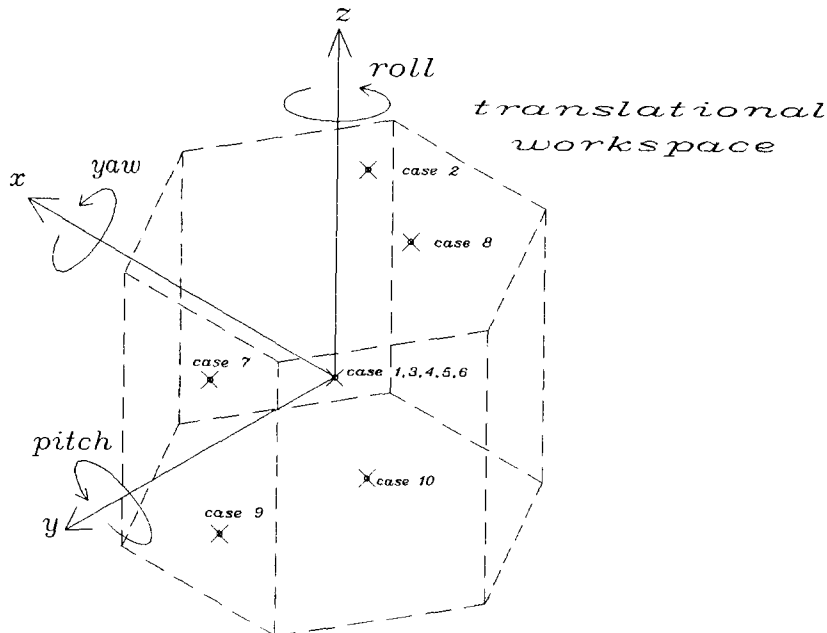


Fig. 7 Endeffector position and orientation in each case

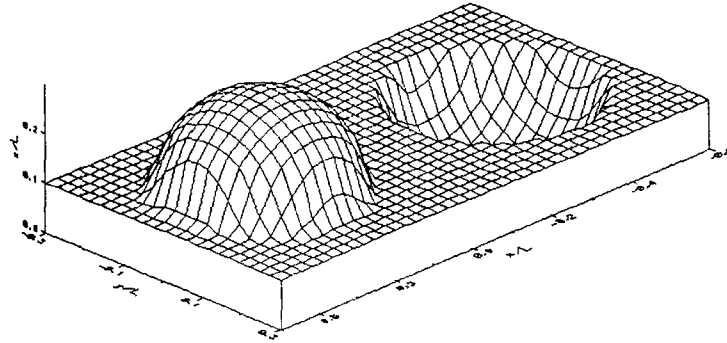
Table 3 The results of the forward kinematics analysis for the numerical example

Case	1-Prismatic actuator		2-Prismatic actuator		3-Prismatic actuator	
	(Horizontal)	(Vertical)	(Horizontal)	(Vertical)	(Horizontal)	(Vertical)
	y_1	z_1	y_2	z_2	y_3	z_3
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
2	-0.700000	0.800000	-0.169615	0.800000	0.869615	0.800000
3	-0.994691	0.057718	-0.994155	-0.003875	-0.993336	-0.053809
4	0.000000	0.000000	0.192297	0.976348	-0.192297	-0.976348
5	0.000000	0.994691	-0.121196	-0.418253	0.121196	-0.418253
6	0.994691	0.000000	0.994691	0.000000	0.994691	0.000000
7	-0.142418	-0.013815	-0.714634	0.677818	-0.458736	0.273374
8	-0.897487	0.060657	-0.974348	0.800993	-0.138701	-0.008384
9	-0.145202	-0.701012	-0.371872	-0.110132	-0.977591	0.560092
10	-0.970716	-0.158459	-0.713417	0.113975	0.583720	-0.813249
	Platform position			Platform orientation(deg.)		
	x	y	z	γ	β	α
1	0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
2	0.600000	-0.700000	0.800000	0.000000	-0.000000	0.000000
3	-0.000000	-0.000000	0.000000	0.999991	-2.000009	-36.999988
4	-0.000000	-0.000000	-0.000000	43.000000	-0.000000	0.000000
5	-0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000	-36.999983	0.000000
6	0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000	-0.000000	36.999990
7	0.200000	0.200000	0.300000	10.000011	15.000001	-17.000000
8	0.300000	-0.400000	0.200000	14.999996	7.000012	-25.999990
9	-0.200000	0.500000	-0.100000	-12.999983	20.000002	-23.000004
10	0.587400	-0.720900	-0.338400	21.236304	-13.087400	-18.829308

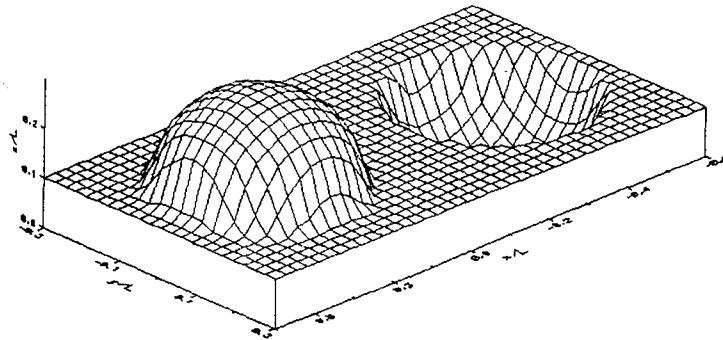
을 수행하고 첨단부의 목표궤적을 비교함으로써 기구학 해석의 결과를 증명하고자 하였다. 즉, 식 (9)로부터 6개의 선형구동부의 변위인 $y_1, z_1, y_2, z_2, y_3, z_3$ 에 따른 기준좌표계에 대한 세 구형조인트의 카테시안 공간상의 위치벡터 S_1, S_2, S_3 를 구하고, 이로부터 첨단부의 위치인 식 (22)의 x, y, z 와 첨단부의 자세인 회전변환행렬의 요소 식 (24)의 roll, 식 (25)의 pitch, 식 (26)의 yaw가 구해진다.

Table 2에서 임의로 주어진 첨단부의 목표궤적

과 Table 3의 정기구학 시뮬레이션 결과인 첨단부의 위치/자세가 일치함을 알 수 있다. 또한 Fig. 8은 각각 반구형 요철형태로 이루어지며 각 점에서 임의(random)한 각도로 첨단부자세를 가진 목표궤적에 대해 역기구학 시뮬레이션에 의한 각 구동부의 변위가 구해지고, 그변위를 입력으로하는 정기구학 시뮬레이션 결과가 서로 일치함을 보여준다. 이로부터 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터 메카니즘은 기존의 6자유도 병렬 매니플레이터와 달리 실시간으로 첨단부의 변위를 계산할 수 있



(a) Target trajectory of endeffector (inverse kinematics input)



(b) Simulation result of forward kinematics analysis

Fig. 8 Simulation results of invrese/forward kinematics analysis

으며, 따라서 부가적인 6축 절대 위치/자세 측정장치 없이 구동부의 변위측정 정보로부터 서보제어가 가능하게 된다.

6. 결 론

3-PPSP(P, S는 prismatic, spherical joints를 의미) 직렬관절을 가진 새로운 개념의 6자유도 병렬 매니플레이터를 제안하였다. 각 직렬관절은 직 접 연결된 2개의 능동조인트와 4개의 수동조인트로 구성되어 있으며, 능동조인트의 변위로부터 3개의 수동조인트의 작용점인 구형조인트의 회전중심위치가 직접 결정된다. 또한 첨단부와 연결되는 각 직렬관절의 선형 수동조인트의 변위를 첨단부에 대하여 일정방향으로 서로 구속함으로써, 능동조인트의 변위로부터 첨단부의 위치/자세를 계산해 내기 위한 기구학적 구속조건을 갖도록 하였다. 이러한 기구학적 구속조건 및 각 조인트의 개별자유도의 조합에 따른 수학적 모델을 수립하고 역기구학 및 정기구학 해석에 의하여 직렬로봇과 마찬가지로 정기

구학의 해석해가 구해짐을 보였으며, 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다. 따라서 부가적인 6축 절대 위치/자세 측정장치없이 첨단부의 변위인 정기구학의 모든 해는 실시간으로 계산될 수 있으며, 첨단부의 6자유도 위치/자세를 입력으로 하는 역기구학을 사용한 서보제어가 가능하다.

일반적으로 산업상 응용을 고려한 로봇의 작업영역을 고려할 때 높이에 따라 모양과 크기가 같은 원형단면을 가진 작업영역이 가장 이상적이다. 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 선형구동부의 최대 선형변위에 비례한 정육각기둥 형태의 가능한 병진작업영역을 가진다. 작업영역의 크기는 능동조인트의 최대변위와 첨단부 중심축으로부터 구형조인트 회전중심의 평면 운동영역까지의 배치거리와 관련된 함수이며 대칭성과 가반하중의 균등한 분포를 고려한 직렬관절의 배치로 인하여 실제 산업상 응용에 적합한 형태를 가진다. 또한 본 병렬 매니플레이터는 병진 작업영역이 수직방향에 관계없이 일정하며 임의의 위치에서 높이 변화시킬 때 기구형태의 변화가 없다.

하중특성에 있어서 본 연구의 6자유도 병렬 매니플레이터는 첨단부와 직렬형 부속관절이 수동 선형 조인트로 연결되어 있다. 첨단부에 외력이 가해질 경우 첨단부의 중심으로부터 임의의 위치 떨어진 링크의 끝단인 구형조인트의 중심을 향하여 링크의 운동방향과 수직한 반력이 작용되게 된다. 이 힘들은 첨단부의 중심에 대하여 구형조인트 중심까지의 거리를 벡터적인 순수한 모멘트성분으로 작용하게 되며 외력의 작용방향에 대하여 비교적 등방성(homogeneous)의 하중분포 특성을 가진다. 따라서 작업영역 내에서 기구적 형태변화에 따라 각 선형구동부에 걸리는 하중분포에 있어서 변화가 적으며 비교적 작은 작업영역에서 큰 가반하중과 다양한 동작능력 및 정밀도가 요구되는 작업에 효과적인 구조적 특성을 가진다.

추후 연구로서 6자유도 3-PPSP 병렬 매니플레이터의 기구학적 성능을 평가함에 있어서 동작능력과 작업영역, 하중특성은 중요한 척도가 된다. 따라서 매니플레이터의 기구학적 특성을 내포하고 있으며 동작능력을 측정하는 매개체인 자코비안을 유도하고, 설계변수의 최적화에 요구되어지는 동작특성 및 병진회전 작업영역 해석, 능동조인트와 첨단부의 작용력의 상관관계를 나타내는 입/출력 힘분석을 연구하고자 한다.

참고문헌

- (1) Stoughton, R. and Arai, T., 1992, "Design and Kinematic Optimization of Parallel Manipulator," *Bulletion of Mechanical Engineering Lab.*, No. 58, pp. 1~17.
- (2) Ma, O. and Angeles, J., 1993, "Optimum Design of Manipulators under Dynamic Isotropy Conditions," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 470~475.
- (3) Zhuang, H. and Roth, Z. S., 1993, "Method for Kinematic Calibration of Stewart Platforms," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 391~405.
- (4) Griffis, M. and Duffy, J., 1989, "A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 6, No. 6, pp. 703~720.
- (5) Innocenti, C. and Parenti-Castelli, V., 1990, "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 25, No. 6, pp. 611~621.
- (6) Fitzgerald, J. M. and Lewis, F. L., 1993, "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator," *IEEE Trans. on Indust. Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 277~282.
- (7) Nanua, P., Waldron, K. J. and Murphy, V., 1990, "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 4, pp. 438~444.
- (8) Raghavan, M., 1993, "The Stewart Platform of General Geometry has 40 Configurations," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 277~282.
- (9) Merlet, J. P., 1992, "Direct Kinematics and Assembly Modes of Parallel Manipulators," *The International Journal of Robotics Reserach*, Vol. 11, No. 2, pp. 150~162.
- (10) Shi, X. and Fenton, R.G., 1993, "Solution to the Forward Instantaneous Kinematic for a General 6-DOF Stewart Platform," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 7, pp. 236~242.
- (11) Lee, H. Y. and Roth, B., 1993, "A Closed-Form Solution of the Forward Displacement Analysis of a Class of In-Parallel Mechanisms," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 720~724.
- (12) GENG, Z. and HAYNES, L. S., 1992, "Neural Network Solution for the Forward Kinematics Problem of a Stewart Platform," *Robotics and Computer-integrated manufacturing*, Vol. 9, No. 6, pp. 485~495.
- (13) Yee, C. S. and Lim, K. B., 1993, "Neural Network for the Forward Kinematics Problem in Parallel Manipulator," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 6, pp. 1699~1704.
- (14) Behi, F., 1988, "Kinematic Analysis for a Six-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 5, pp. 324~331.
- (15) Check, J. and Tesar, D., 1991, "Analysis of a

- Fully-Parallel Six-Degree-of-Freedom Micromanipulator," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 814~820.
- (16) Tsai, L. W. and Tahmasebi, F., 1993, "Synthesis and Analysis of a New Class of Six-Degree-of-Freedom Parallel Minimanipulators," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 561~580.
- (17) Sorli, M. and Ceccarelli, M., 1993, "On the Workspace of a 6 D. O. F Platform with Three Articulated Double-Parallelograms," *ICAR*, Vol. 1, pp. 147~152.
- (18) Alizade, R. I. and Tagiyev, N. R., 1994, "A Forward and Reverse Displacement Analysis of a In-Parallel Manipulator," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 29, No. 1, pp. 115~124.
- (19) Kohli, D. and Lee, S.H., 1988, "Manipulator Configurations Based on Rotary-Linear (R-L) Actuators and Their Direct and Inverse Kinematics," *Journal of Mach., Transmissions and Automation in design*, Vol. 110, pp. 397~404.
- (20) Cleary, K. and Brooks, T., 1993, "Kinematic Analysis of a Novel 6-DOF Parallel Manipulator," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 708~713.
- (21) Parenti-Castelli, V. and Innocenti, C., 1990, "Forward Displacement Analysis of Parallel Mechanisms. Closed Form Solution of PRR-3S, PPR-3S Structures," *Proceedings of the 21th Biennial Mechanisms Conference : Mechanism Synthesis and Analysis, Chicago, Illinois, ASME, DE-Vol. 25*, pp. 111~116.
- (22) Stoughton, R. and Arai, T., 1991, "Optimal Sensor Placement for Forward Kinematics Evaluation of a 6-DOF Parallel Link Manipulator," *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robot and Systems IROS' 91*, Nov. 3-5, pp. 785~790.
- (23) Merlet, J. P., 1993, "Closed-Form Resolution of the Direct Kinematics of Parallel Manipulators using Extra Sensors Data," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 200~204.
- (24) Check, K. C., Overholt, J. L. and Beck, R. R., 1993, "Exact Methods for Determining the Kinematics of a Stewart Platform using Additional Displacement Sensors," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 689~707.
- (25) Hunt, K. H., 1983, "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms," *Transactions. ASME. J. MECH., Transmis., Automa. in DEs.*, Vol. 105, pp. 705~712.
- (26) Paul, P., 1981, "Robot Manipulators : Mathematics, Programming and Control," MIT Press.