

2-PPR 구조를 갖는 새로운 3 자유도 평면형 병렬기구의 해석 Analysis of a new planar 3-DOF parallel mechanism with 2-PPR serial sub-chains.

*인우성¹, #김종원¹

*Woosung In¹, #Jongwon Kim(jongkim@snu.ac.kr)¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : parallel mechanism, kinematics, singularity, 3-DOF

1. 서론

병렬기구 구조는 다수의 직렬기구로 구성되어 있고, 하나의 말단장치를 구동할 수 있는 닫힌 구조의 형태의 기구 구조이다. 이는 직렬기구 구조에 비해 빠른 속도 특성, 질량 대비 높은 강성, 높은 정밀도를 갖는다¹. 이와 같은 장점으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 비행 시뮬레이터, 촉각 모사장치, 정밀 이송기계 및 위치결정용 장비의 개발 등에 사용되고 있다. 이는 공간상에서 제한된 6 자유도 움직임을 구현할 수 있는 스튜어트-고흐 플랫폼(Stewart-Gough)과 3 자유도의 델타 구조(Delta) 및 공간상 360도 무한회전을 구현할 수 있는 이클립스 구조(Eclipse) 등이 대표적인 예이다^{2,3}.

하지만 이는 공간상의 움직임을 구현할 수 있지만, 평면상의 자유도만이 필요한 경우에는 불필요한 자유도를 갖는다. 따라서 평면상의 움직임만을 구현하는 평면형 병렬기구의 연구 및 개발도 진행되고 있다. 이 중 평면상의 모든 자유도를 구현하는 3 자유도 평면형 병렬기구의 경우, 대부분의 기구 구조가 3 개의 직렬기구로써 구성되어 있어 병렬기구가 갖는 단점인 복잡한 기구학 해석, 제한된 작업 영역, 서로 연관된 움직임 특성과 특이점 문제를 갖는다.

본 논문에서는 위에서 언급한 문제점을 보완하는 새로운 구조의 평면형 3 자유도 병렬기구 구조를 제안한다. 본 구조는 해석적으로 기구학 해를 구할 수 있으며, 기존의 평면형 병렬기구 구조에 비해 상대적으로 높은 회전성능인 $\pm 90^\circ$ 및 부분적 비연성 움직임을 구현한다.

2. 기구학 해석

Fig. 1 에서 보이는 바와 같이 본 논문에서 제안한 3 자유도 평면형 병렬기구 구조는 2 개의 PPR 직렬기구로 구성되어 있다. 여기에서 P, R 은 각각 미끄럼 관절(prismatic joint)와 회전 관절(revolute joint)을 나타낸다. 처음 위치한 P 는 고정된 직선형 가이드(linear guide)를 따라 움직이는 미끄럼 관절을, 다음의 P 는 처음의 직선형 가이드와 수직으로 위치하며 처음의 미끄럼 관절과 연결된 링크(link) 위를 움직이는 미끄럼 관절을 나타낸다. 마지막으로 R 은 두번째의 미끄럼 관절과 연결된 링크와 작업 대상물이 놓이는 운동 플랫폼(moving platform)을 연결하는 회전 관절을 나타낸다. 본 기구구조는 3 자유도를 갖는 병렬기구 구조로써 3 개의 독립관절을 갖고, 이는 4 개의 미끄럼 관절 중 3 개를 선정, 각 독립관절에 구동기를 부착하여, 기구를 구동한다. 독립관절의 위치 및 본 논문에서 수행하는 해석을 위한 기구 변수 및 좌표계의 정의는 Fig. 1 및 Table 1 에 명시한다.

기구 해석 과정 중 역기구학 해석(inverse kinematics)은 기구의 운동 플랫폼에 위치한 운동 좌표계 {M}의 위치와 자세가 주어졌을 때, 각 구동 관절의 관절 값을 구하는 것이다. 본 논문의 3 자유도 평면형 병렬기구에 대해서는 각 직렬기구의 역기구학을 푸는 것에 의해 구할 수 있으며, 이는 고정 좌표계를 기준으로 표현된 운동 좌표계의 위치와 자세로부터 구해진 회전 관절의 위치 정보로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_{i1} = b_{1y}, \quad \rho_{i2} = R_1 - (-1)^i b_{ix} \quad (\text{단, } i = 1, 2) \quad (1)$$

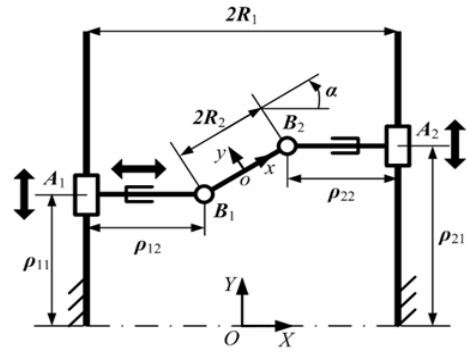


Fig. 1 Architecture and geometric parameters of the mechanism

Table 1 Nomenclature

R_1	고정 좌표계 {F}의 원점에서 직선가이드까지 거리
R_2	운동 좌표계 {M}의 원점에서 회전관절까지 거리
B_i	회전 관절 ($i = 1, 2$)
A_i	직선 가이드 위의 미끄럼 관절 ($i = 1, 2$)
ρ_{i1}	관절 변수 (Y 방향) ($i = 1, 2$)
ρ_{i2}	관절 변수 (X 방향) ($i = 1, 2$)
\bar{b}_i	고정 좌표계로 표현된 회전관절 위치벡터
\bar{a}_i	고정 좌표계로 표현된 미끄럼 관절 위치벡터
\bar{p}	고정 좌표계로 표현된 운동 좌표계 원점 위치벡터
\bar{p}_a	구동관절 벡터 ($\rho_{11}, \rho_{21}, \rho_{12}$)
\bar{p}_p	수동관절 벡터 (ρ_{22})

역기구학 해석과정과 반대로, 정기구학 해석(forward kinematics)은 구동 관절의 값이 주어졌을 때, 운동 좌표계 {M}의 위치와 자세를 결정하는 문제이다. 일반적인 병렬기구에서 정기구학의 해는 유일하지 않으며, 해석적으로 구하는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 하지만 본 논문의 병렬기구 구조는 정기구학의 해가 두 개가 존재하지만, 이를 해석적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 정기구학 해를 구하는 과정은 구동 관절 값과 기구학적 구속조건(2)으로부터 수동 관절의 값(3)을 결정한 후, 이를 바탕으로 운동 좌표계의 위치(4)와 자세(5)를 결정한다.

$$g(\bar{p}_a, \rho_p) = (\bar{b}_1 - \bar{b}_2)^T (\bar{b}_1 - \bar{b}_2) - (2R_2)^2 = 0 \quad (2)$$

$$\text{단, } \bar{b}_i = [(-1)^i (R_1 - \rho_{i2}) \quad \rho_{i1}]^T$$

$$\rho_{22} = (2R_1 - \rho_{12}) \pm \sqrt{(2R_2)^2 - (\rho_{21} - \rho_{11})^2} \quad (3)$$

$$\bar{p} = (\bar{b}_1 + \bar{b}_2) / 2 \quad (4)$$

$$R = [\bar{R}_x \quad \bar{R}_y], \quad \text{단, } \bar{R}_x = (\bar{b}_2 - \bar{p}) / L_2 = [R_{xx} \quad R_{xy}]^T \quad (5)$$

3. 특이점 해석

일반적인 병렬기구 구조는 특이점(singularity)을 갖게되며, 이는 구성공간 특이점(configuration space singularity), 구동기 특이점(actuator singularity), 그리고 말단장치 특이점

(end-effector singularity)으로 구분된다⁴. 이는 서로 종속 관계에 있는 변수들 간의 시간 변화율에 대한 선형 관계적인 자코비안을 계산함으로써 구할 수 있는데, 구동기 특이점은 구동 관절과 수동 관절사이의 관계를 표현하는 구속 자코비안을 통해서 얻을 수 있으며, 말단장치 특이점은 정방향 자코비안을 통해서 구할 수 있다.

구속 자코비안은 2 절에서 정의한 기구학적 구속조건을 이용하여 (6)과 같이 표현할 수 있으며, 정방향 자코비안은 구속 자코비안과 정기구학 식을 이용하여 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{p}_p = - \left(\frac{\partial g}{\partial p_p} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial p_a} \dot{p}_a \quad (6)$$

$$\vec{V} = J_a \dot{p}_a + J_p \dot{p}_p = \left(J_a - J_p \left(\frac{\partial g}{\partial p_p} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial p_a} \right) \dot{p}_a = J_f \dot{p}_a \quad (7)$$

이를 이용하여 본 논문에서 제안한 병렬기구 구조의 특이점을 해석하면 본 기구구조에 대해서는 구동기 특이점이 존재하며, 이는 Fig. 2(a)에서 보이는 바와 같이 운동 플랫폼의 자세가 ±90°인 순간이다.

기구 구조에서 발생하는 특이점이 목적인 작업영역 안에 존재하게 되면, 원하는 성능을 구현할 수 없다. 따라서 이를 회피하거나 제거해야 한다. 이를 위하여 기구 구조의 변경, 구동기 위치의 변경 및 여유 구동기의 추가 등의 방법이 해결 방법으로 제시되어 있다. 본 논문에서는 ±90°이상의 높은 회전성능을 목표로 제시하였으므로, 구동기 특이점을 제거할 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 한 개의 구동기를 수동관절에 추가하는 과구동 방법을 제시한다. 이는 특이점을 제거하는 동시에, 기구구조의 대칭성(symmetry)를 이루어 내는 효과도 얻을 수 있다. 이를 통하여 모듈화 설계가 가능하며, 제작이 용이하고, 힘 전달 문제 등에서 유리함을 갖는다.

4. 작업영역 해석

기구의 작업영역은 플랫폼에 부착된 운동 좌표계 {M}이 구현할 수 있는 모든 위치와 자세로 결정할 수 있다. 이는 기구구조 특성과 관계가 있으며, 각 링크의 회전 및 직선 운동 성능과 밀접한 연관이 있다. 특히, 병렬기구 구조에서는 각 관절들의 성능 한계와, 링크간의 간섭 및 링크와 다른 기구 부품 사이의 간섭에 의해서 작업영역의 제한이 발생한다. 다양한 작업영역의 분류 중에 본 병렬기구 구조에서 중요한 관점으로 보는 것은 자유 작업영역(dexterous workspace)이다. 이는 플랫폼이 구현할 수 있는 모든 자세를 갖는 위치 정보만을 나타내는 작업영역이다. 실제 기구를 사용함에 있어 특정 자세가 구현되지 않는 경우는 활용도가 떨어지게 되므로, 모든 자세를 구현할 수 있는 자유 작업영역이 실제 기구 제작 및 사용에 필요하게 되기 때문이다.

이 경우의 자유 작업영역 해석은 목표로 삼은 회전 성능인 ±90°를 모두 만족하는 플랫폼의 위치정보를 시각적으로 표현하는 것으로 수치적으로 해석하였다. 이는 Fig. 2(b)에서 보여진다.

. 시작품 제작

본 논문에서 제안한 3 자유도 평면형 병렬기구 구조를 이용하여 시작품을 제작하고 있다. 본 시작품의 목적은 본 기구 구조의 이론 해석의 검증 뿐 아니라, 병렬기구 구조의 장점을 이용한 초고속 위치 결정용 장치를 개발함이다. 이에 따라 시작품에 대한 요구 조건을 결정한 후 설계 및

제작 중에 있다. 시작품의 최대 속도는 150 m/min, 최대 가속도는 2.0G를 목표로 하며, 최대 각속도 700 deg/sec와 최대 각가속도 2,500 deg/sec²을 목표로 한다. 이에 따라 Yaskawa의 linear motor인 SGLFW-35A230A와 SGLTW-35A320A를 이용한 시스템 설계를 진행하고 있다.

. 결론

본 논문에서는 평면에서 모든 움직임을 구현할 수 있는 새로운 평면형 3 자유도 병렬기구 구조를 제안하였다. 이 기구 구조는 기구학적 해석을 통하여, 기존의 평면형 3 자유도 병렬기구 구조의 단점이었던, 기구학 해석의 복잡성 및 해석적으로 풀리지 않는 점 및 연성을 갖는 움직임을 단점을 보완하는 구조임을 확인하였다. 기존의 병렬기구 구조에서 구현하기 힘든 ±90°의 높은 회전 성능을 구현할 수 있는 기구 구조로써, 현재 이의 이론적 해석을 검증하기 위한 시작품 제작을 진행하고 있다. 이는 검증 뿐 아니라 병렬기구 구조의 장점을 최대한 살리는 빠른 속도 및 가속도를 구현함을 동시에 목표로 삼고 있다.

후기

이 논문은 2007년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Merlet.J-P, Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2000.
2. Stewart.D., A Platform with six degrees of freedom, Proc. Inst. Mech. Eng., 180 Part I/15, 371-386, 1966.
3. Jongwon Kim, Jae-Chul Hwang, Jin-Sung Kim, Cornel C. Iurascu, F.C.Park and Young Man Cho, Eclipse-II: A New Parallel Mechanism Enabling Continuous 360-degree Spinning Plus Three-axis Translational Motions, IEEE Trans. On Robotics and Aut., IEEE Vol.18 No.3 Jun 367-373, 2002.
4. F.C.Park and J.W.Kim, Singularity Analysis of Closed Kinematic Chains, ASME J. Mechanical Design, vol 121 no 1 32-38, 1999.

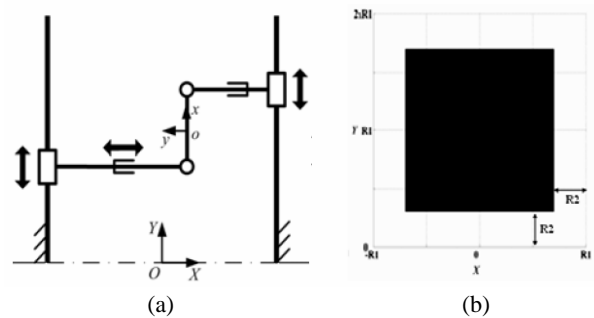


Fig. 2(a) Actuator singularity configuration

Fig. 2(b) Dexterous workspace

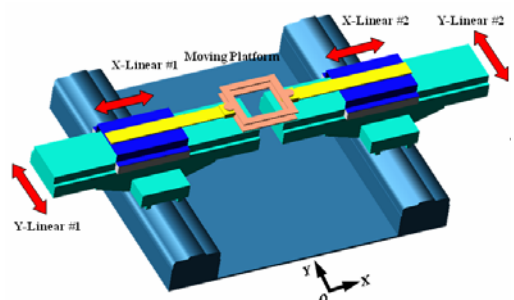


Fig. 3 Conceptual design for prototype