

◆특집◆ 병렬기구

이클립스: 새로운 병렬기구 플랫폼

김진성*, 김종원**

Eclipse: A New Parallel Mechanism Platform

Jin Sung Kim*, and Jongwon Kim**

Key Words : Eclipse (이클립스), Eclipse-II (이클립스-II), Parallel mechanism (병렬기구), Kinematics (기구학), Singularity (특이점), Over-actuation (초과구동)

1. 서론

기존의 공작기계 및 로봇 등은 대부분 그 기구학적 기본 구조로서 각 축이 직각으로 연결되어 외팔보 구조를 가지는 직렬기구를 채택하고 있다. 이러한 직렬기구와 대비되는 구조로서 몇 개의 직렬기구가 병렬로 연결되어 작업 플랫폼을 이송시키는 병렬기구가 있다. 이러한 병렬기구는 직렬기구에 비해 이송부의 관성 질량을 감소시킬 수 있어 이송 속도 및 가속도를 크게 증가시킬 수 있고, 각 링크의 오차가 이송부의 평균하여 반영됨으로써 오차가 누적되는 직렬기구에 비해 기계의 정밀

도를 향상시킬 수 있다. 또한 기구가 받는 힘을 여러 개의 링크로 분산시킬 수 있어 기구의 강성을 높일 수 있는 장점이 있다. 이러한 여러 장점으로 병렬기구를 여러 분야에 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 6-자유도 병렬기구 플랫폼은 Fig.1 과 같은 스텐워드-고흐 (Stewart-Gough) 플랫폼이다. 이것은 1962 년 고흐가 타이어 검사장비에 스텐워드-고흐 플랫폼을 응용하면서 자동차 산업에서 사용되기 시작하였으며, 1965 년 스텐워드가 비행기 운동재현기의 기본구조로 채택하면서 국방 및 항공산업계로 그 응용성이 확장되었다.

1988 년에는 클라벨이 Fig. 2 와 같은 ‘델타 (DELTA)’라는 3-자유도 병렬기구 플랫폼을 고안하

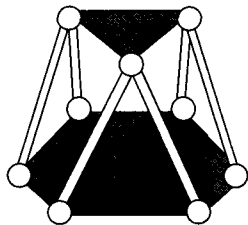


Fig. 1 Structure of the Stewart platform

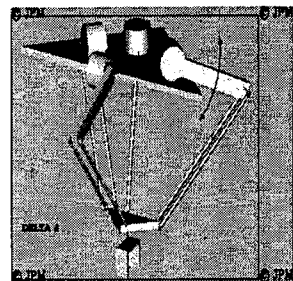


Fig. 2 Structure of the Delta platform

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

Tel. 02-880-7138, Fax. 02-883-1513

Email jongkim@snu.ac.kr

생산 시스템 특히, 병렬기구 응용분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

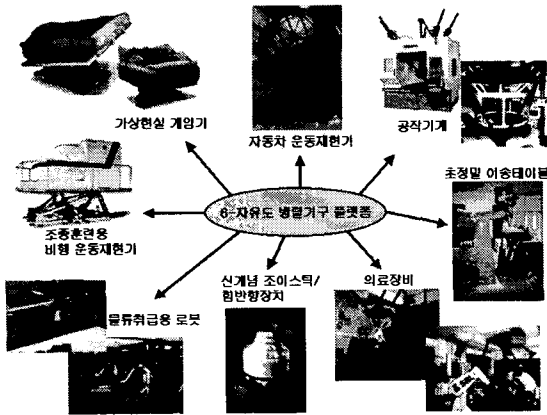


Fig. 3 Applications of the parallel mechanism

였고, 이것을 기본구조로 해서 고속운동이 가능한 로봇이 개발되었으며, 이것은 전기전자 및 식료품 제조현장에서 고속으로 부품을 취급하고 조립하는 용도로 사용되고 있다. 1994년에는 기딩스앤루이스(Giddings & Lewis)라는 공작기계업체에서 세계 최초로 스투어트-고흐 플랫폼을 이용한 공작기계를 발표해서 병렬기구 응용에 새로운 계기를 만들었다.

오늘날 병렬기구 플랫폼이 기본구조가 되어 개발된 기계들을 살펴보면, Fig.3에서 보이는 바와 같이 그 적용분야가 매우 광범위하고 다양하다. 우선 병렬기구 운동재현기로서, 국방 및 민간 항공기 조종 훈련용 비행 운동재현기와 자동차 운동을 재현하는 운동재현기가 있으며, 선박용 및 승마 운동을 재현하는 운동재현기도 있고, 가상현실을 재현하는 병렬기구 첨단계임기가 개발되어 많은 테마파크에 설치되어 있다. 한편, 상용화된 산업용 병렬기구 로봇이 있는데, 주로 고속 물류취급장치로 사용된다. 그리고, 근래에 병렬기구 공작기계인 헥사포드(Hexapod) 시리즈들이 많은 회사에서 개발되었으며, 초정밀 위치제어 이송테이블로도 병렬기구 플랫폼이 응용이 되고 있다. 한편, 병렬기구 구조의 의료용 수술설비 및 신개념 조이스틱이나 힘반향장치(force feedback device) 등도 개발되었다.

그런데, 기존 병렬기구 구조에서 기술적으로 가장 큰 한계는 플랫폼의 경사각이 최대 30° 정도로 제한이 된다는 점이다. 경사각이 제한되어 있

으므로, 운동재현기로 사용이 될 경우, 전진하면서 측면으로 360° 연속 회전한다든지 하는 일반적인 모든 운동을 재현하는 것이 불가능하다. 한편, 공작기계 또는 로봇의 기본구조로 사용이 될 경우에도, 주축이나 엔드이펙터(end-effector)의 운동 경사각이 최대 30° 정도 이내이므로, 소재의 상면과 측면의 5면을 전부 접근하는 것은 불가능하다.

이러한 기존의 병렬기구 플랫폼의 단점을 극복하기 위해서, 본 논문에서는 새로운 형태의 6 자유도 병렬기구인 이클립스(Eclipse) 구조를 제안한다. 이클립스는 기존 병렬기구와는 달리 플랫폼의 경사각을 90°까지 가능하게 하여 작업영역을 극대화한 구조로서, 공작기계의 구조로 응용할 경우 5면 동시 가공을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이클립스 구조를 확장한 이클립스-II(Eclipse-II) 구조를 제안한다. 이클립스-II 구조의 플랫폼은 x, y, z 병진운동 뿐만 아니라 a, b, c 축 360° 연속 회전이 가능하며, 비행기용 운동재현기 등으로 응용할 경우 기존의 운동재현기로 구현되는 운동들은 물론이고, 지금까지 재현이 불가능하였던 운동들도 모두 재현을 할 수 있다.

2. 이클립스의 기구학 해석

Fig.4에서 보는 바와 같이 이클립스는 고정된 원형 가이드를 따라 각각 독립적으로 움직이는 세 개의 PPRS 직렬기구로 구성된다. 여기서 P는 직선 이송 조인트(prismatic joint), R은 회전조인트(revolute joint), S는 볼조인트(ball joint)를 나타낸다.

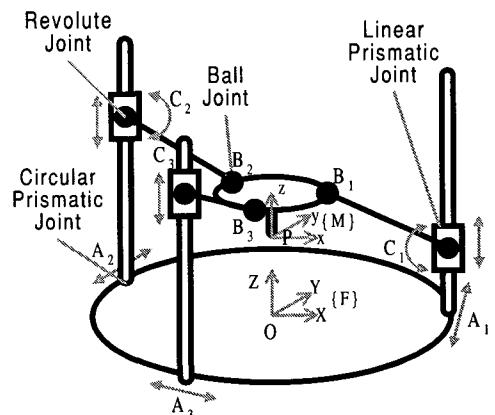


Fig. 4 Schematic view of the Eclipse.

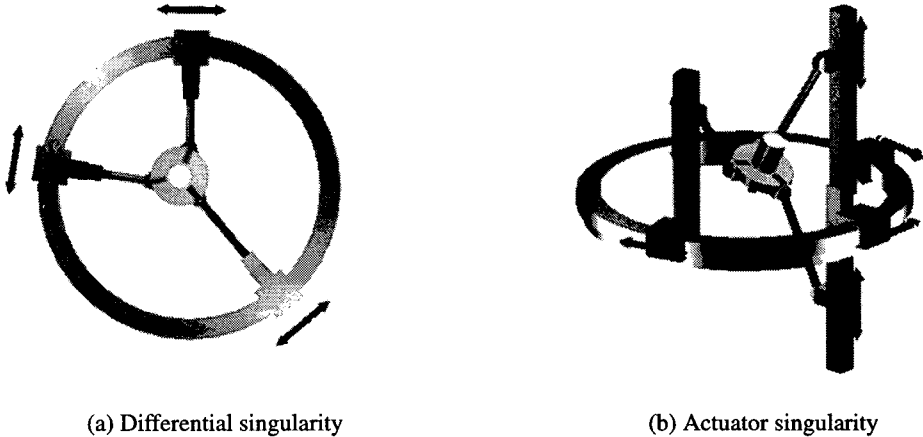


Fig. 5 Singular configurations of the Eclipse.

이클립스는 총 6 자유도를 가지며, Fig.4 에서 화살표로 표시된 8 개의 능동 조인트(active joint)에 의해 구동된다. 즉, Fig.4 에서 보는 바와 같이 3 개의 수직칼럼이 원형 가이드 위를 움직이며, 작업 플랫폼과 볼조인트로 연결된 3 개의 링크가 수직칼럼과 회전조인트로 연결되어 수직칼럼 상을 상하로 움직인다. 또한 2 개의 회전조인트가 액츄에이터에 의해 구동된다. 이클립스는 위치 작업영역(position workspace) 뿐만 아니라 자세 작업영역(orientation workspace)도 크게 하여 엔드이펙터가 수직 위치에서 수평 위치까지 연속적으로 움직일 수 있도록 하였으며, 어떠한 방향에서도 Z 축을 중심으로 360° 회전할 수 있도록 설계되었다.

2.1 일반적인 병렬기구의 특이점 해석

특이점은 병렬기구의 설계와 제어에 있어서 가장 중요한 문제이다. 직렬기구와 달리 특이점 근처에서의 구동은 병렬기구에 심각한 파괴를 초래할 수 있다. 병렬기구에서의 특이점은 크게 엔드이펙터 특이점(end-effector singularity)과 액츄에이터 특이점(actuator singularity)으로 나눌 수 있다. 엔드이펙터 특이점은 엔드이펙터의 자유도가 감소하는 경우이며, 액츄에이터 특이점은 자유도가 증가하는 경우이다.

엔드이펙터 특이점은 구속조건식을 수동 관절에 대해 편미분한 자코비안의 계수(rank)가 감소할 때 발생하고, 액츄에이터 특이점은 정기구학 자코

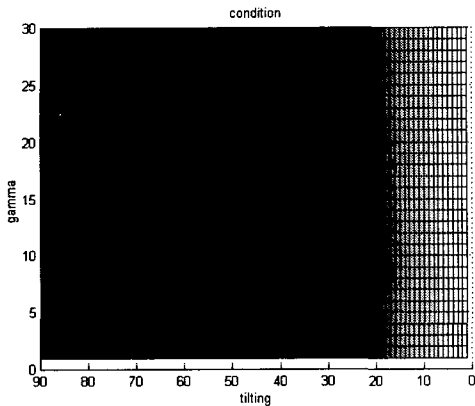
비안의 계수가 감소할 때 발생한다. Fig.5 는 특이점이 발생하는 기구 자세의 예로 각 자코비안 행렬의 컨디션 수(condition number)를 계산하는 것에 의해 찾을 수 있다. 액츄에이터 특이점은 공구가 약 30°와 60° 기울어졌을 때 발생하게 되며, 엔드이펙터 특이점은 플랫폼의 볼조인트가 원형 가이드의 중심에 위치할 때 발생한다. 하지만 엔드이펙터 특이점은 이클립스의 작업영역 바깥이므로, 고려하지 않아도 된다.

일반적으로 병렬기구의 모든 특이점을 해석적으로 찾는 방법은 아직까지 없다. 따라서 작업영역내의 모든 점에서 컨디션 수를 계산하는 수치적인 방법을 이용하여 특이점의 위치를 찾을 수 있다.

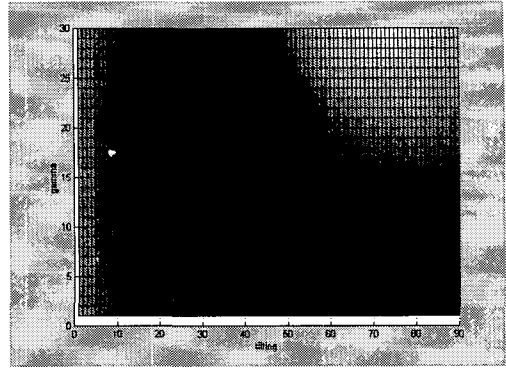
2.2 초과구동 병렬기구의 특이점 해석

이클립스가 액츄에이터 특이점에 위치할 때 발생하는 문제는 다음과 같다. 첫번째로 기구에 외력이 가해질 때, 기구가 평형 상태를 유지할 수 없다는 것이다. 이러한 현상은 기구가 여분의 자유도를 가지는 것으로 해석할 수 있다. 두 번째는 특이점 위치에서 정기구학식의 해가 두개 또는 그 이상의 방향으로 나뉘어 진다는 것이다. 즉 같은 능동 조인트 값에 대해 여러 개의 공구 자세가 가능하다. 따라서 이러한 특이점을 지나갈 때, 기구는 원하지 않는 방향으로 움직일 수 있다.

액츄에이터 특이점은 부가의 액츄에이터를 추



(a) Condition plot of 6 actuated Eclipse



(b) Condition plot of 7 actuated Eclipse

Fig. 6 Condition number plot when tilting from 0° to 90°.

가하는 것으로 해결할 수 있다. 즉, 특이점에서 외력에 견딜 수 있는 반력을 제공하고, 원하는 경로를 따라 움직이도록 강제하는 역할을 하는 액츄에이터를 추가하는 것이다.

Fig.6(a)는 6 축 이클립스 기구가 플랫폼의 경사각 0°에서 90°까지 움직일 때의 컨디션 수를 나타낸다. x 축은 경사각이고 y 축은 운동 좌표계의 z 방향 회전각(γ)이다. 그리고 색의 명암이 컨디션 수의 크기를 나타낸다. 즉, 컨디션 수가 클수록 특이점에 가까운 것이고 그림에서는 짙은 색으로 나타난다. 예를 들어, $\gamma = 0^\circ$ 이면 경사각이 30°와 40° 사이, 50°와 60° 사이일 때 특이점이 나타난다. 그런데 그림에서 보는 바와 같이 특이점 위치가 띠의 형태로 나타나므로, 공구가 90°까지 경사할 때에는 반드시 이러한 특이점 띠를 지나게 되어 이를 회피하는 것은 불가능하다.

Fig.6(b)는 하향 칼럼의 회전조인트에 액츄에이터 하나를 추가할 때의 컨디션 수를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 경사각 30° 부근에서 띠의 형태로 특이점이 나타남을 알 수 있다. 이 경우 이론적으로는 γ 를 변화시켜 특이점을 회피할 수 있으나, 실제로는 기구의 가공 공차 등으로 인해 회피가 불가능하다. 하향 칼럼의 회전조인트와 더불어 2 개의 상향 칼럼 회전조인트 중 하나에 액츄에이터를 추가하면, 액츄에이터 특이점은 완전히 사라진다. 따라서 8 축을 가지는 초과구동(over-actuated) 기구 구조로서 특이점 문제를 해결할 수 있다.

2.3 작업영역

기구의 작업영역은 엔드이펙터가 도달할 수 있는 위치와 자세의 집합으로 정의된다. 미분 기하학적 정의에 의하면 작업영역은 고정 좌표계나 운동 좌표계의 선택과 무관하다. 그리고 위치 작업영역과 자세 작업영역의 크기는 서로 반비례 관계가 있다. 이클립스에서는 작업영역을 다음과 같은 방법으로 정량화 하였다.

엔드이펙터의 방향은 오일러 각도(Euler angles), 고정 각도(fixed angles), 지수 좌표계(exponential coordinates) 등의 여러 가지 방법으로 표현할 수 있다. 이클립스에서는 이 중에서 Z-Y-Z 고정 각도를 사용한다.

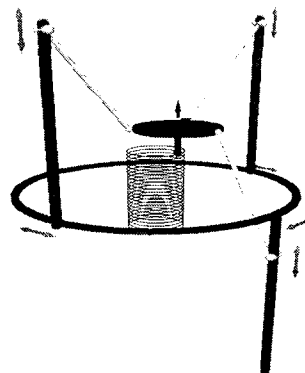


Fig. 7 Cartesian workspace of the Eclipse for tilting angle 0°.

주어진 경사각에 대한 실제 카테시안 작업영역을 계산하기 위해서는 다음과 같은 물리적인 제약 조건들을 고려하여야 한다.

- (1) 직선 이송 조인트의 이송 한계
- (2) 수직 칼럼 간의 간섭
- (3) 수직 칼럼과 고정 링크 간의 간섭
- (4) 볼조인트의 회전각 한계

위의 제약 조건들 중에서 볼조인트의 회전각 한계가 가장 중요하다. Fig.7 은 경사각이 0°일 때 이클립스의 카테시안 작업영역을 나타낸다.

위의 4 가지 제약 조건들을 고려하여 작업영역을 구하면 그 크기는 지름 100mm, 높이 100mm 인 원기둥 형태이다. 여기에서 사용된 기구변수는 다음과 같다. 플랫폼의 지름은 200 mm, 원형 가이드의 지름은 600 mm, 링크의 길이는 330 mm, 공구의 길이는 75 mm, 그리고 볼조인트의 회전각 한계는 55°이다.

3. 이클립스-EMO 및 이클립스-RP 제작

스튜어트-고흐 플랫폼 구조를 가지는 공작기계의 단점은 공구의 경사각이 30°로 제한된다는 것이다. 이클립스는 이러한 한계를 극복하여 공구 경사각이 90°까지 가능하다. 이클립스가 쾌속 가공을 위한 공작기계의 기본 구조로서 응용 가능한지를 확인해 보기 위해 1997 년에 Fig.8 과 같은 시작품을 개발하였다. 이것은 원형 가이드 위를 독립적으로 움직이는 3 개의 수직 칼럼으로 구성된

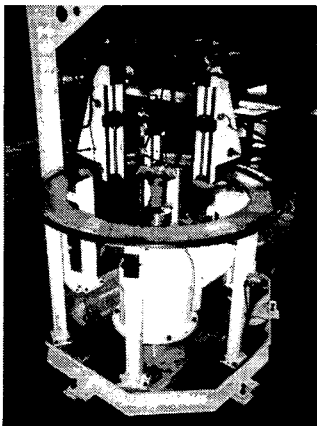


Fig. 8 Eclipse Prototype



Fig. 9 Eclipse-EMO

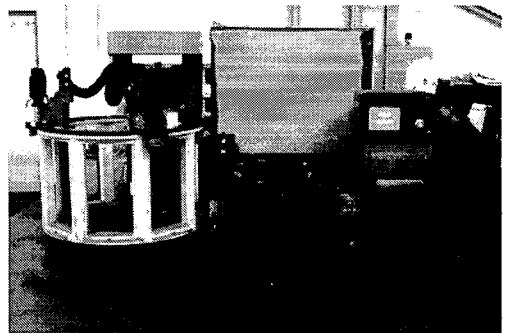


Fig. 10 Eclipse-RP

다. 각 칼럼은 서보 모터(servo motor)와 링 기어, 피니언 기어에 의해 이송된다. 또한 각 칼럼에는 선형 이송 가이드(linear guide), 볼스크류, 서보 모터에 의해 상하로 직선 운동하는 이송부가 있다. 여기에 작업 플랫폼과 볼조인트로 연결된 고정 링크가 회전 조인트에 의해 연결된다. 3 개의 회전조인트 중 2 개의 조인트는 하모닉드라이브를 통해 연결된 서보 모터에 의해 구동된다. 기계의 중앙부에는 가공 시편을 고정할 수 있는 척(chuck)이 있는데 이것은 시편과 함께 회전이 가능하여 밀링 이외의 선삭 작업을 수행할 수 있다. 즉 밀링이나 드릴링, 보어링, 탭핑 작업시에는 시편이 고정된 상태에서 공구가 회전하여 작업을 수행하고, 선삭 작업시에는 공구를 90°로 기울인 후, 시편이 회전하여 선삭을 수행할 수 있다. 이런 방법으로 같은 플랫폼에서 밀링, 선삭 등의 복합 공정을 수행할 수 있다.

공구는 수직에서 수평으로 자유로이 움직일 수 있으므로, 한 번의 공작물 셋업으로 5 면 가공을 수행할 수 있다. 또한 공구가 수평인 상태에서 공작물의 옆면을 따라 움직일 수 있으므로 기존 공작기계와 같은 B 축의 인텔싱이 필요 없다. 이와 같이 공구는 수직에서 수평까지의 전 범위에 위치할 수 있으므로 5 면 동시 가공이 가능하다.

이러한 시작품 개발로 축적된 기술을 바탕으로 1999 년 이클립스-EMO (Fig. 9)로 불리는 이클립스 상용화기를 제작하여 유럽공작기계전시회 (EMO '99)에 출품하여 많은 호평을 받았다.

또한 쾌속시작기에 응용하여 2001 년 이클립스-RP (Fig. 10)를 제작, 미국 신시내티에서 개최되는 Rapid Prototyping & Manufacturing Exhibition 에 출품하였다. 기존 SLA 와 같은 쾌속시작 방식에 비해 이클립스-RP 는 10~30mm 정도의 두꺼운 판재를 사용하여 가공시간 및 정밀도를 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 셋업의 바꾸지 않고, 5 면 가공의 후처리가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

4. 이클립스-II

기존의 운동재현기는 대부분 스튜어트-고흐 플랫폼을 사용한다. 스튜어트-고흐 플랫폼은 병진과 회전이 가능한 6 자유도 기구이기는 하나, 플랫폼의 경사각이 30° 정도로 제한이 되어, 운동을 모사하는데 한계가 있다. 이에 비해 이클립스 구조를 확장한 이클립스-II 구조의 경우, 플랫폼이 x, y, z 병진운동 뿐 아니라, a, b, c 축으로 360° 연속적인 회전운동이 가능하다. (Fig.11)

이클립스-II 는 이클립스 구조에서 하나의 수직 칼럼을 원형칼럼으로 바꾼 것으로 Fig.12 와 같은 구조를 가진다. 즉, 하나의 원형칼럼과 두개의 수직칼럼이 원형 가이드 위를 움직이며, 플랫폼과 볼조인트로 연결된 3 개의 링크가 원형칼럼 또는 수직칼럼과 회전조인트로 연결되어 칼럼 위를 움직인다. 이클립스-II 의 각 기구 변수들은 다음과 같다. 원형 가이드와 원형칼럼의 지름은 2000 mm, 플랫폼의 지름은 300 mm, 원형칼럼과 연결된 링크의 길이는 900 mm, 수직칼럼과 연결된 링크의 길이는 780 mm 이다.

4.1 특이점 해석

이클립스-II 에서는 작업영역 내에 엔드이펙터

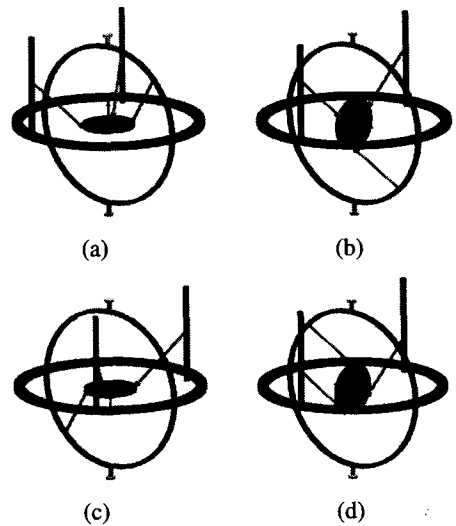


Fig. 11 Eclipse-II mechanism and its 360-degree continuous rotational motions: (a) Rotation angle 0°, (b) Rotation angle 90°, (c) Rotation angle 180°, and (d) Rotation angle 270°.

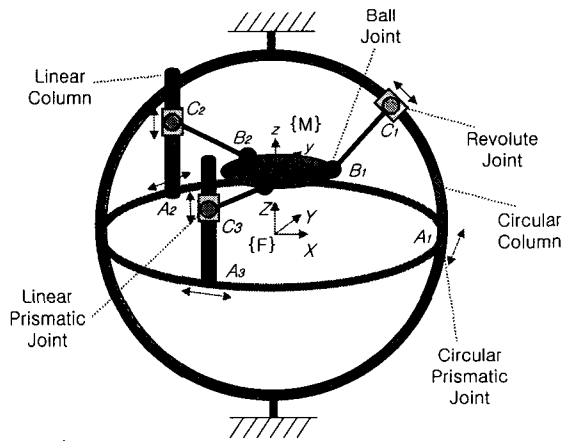


Fig. 12 Structure of the Eclipse-II mechanism

특이점과 액츄에이터 특이점이 모두 나타난다. 액츄에이터 특이점의 경우는 앞에서 기술한 바와 같이 초과구동을 통해 해결할 수 있다. 그에 비해 엔드이펙터 특이점은 엔드이펙터의 자유도가 감소하는 상태이므로 자유도를 추가해 줌으로써 해결할 수 있다.

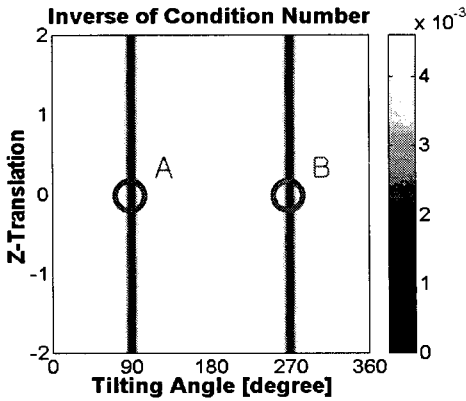


Fig. 13 Condition number plot of the end-effector singularity configuration of the Eclipse-II

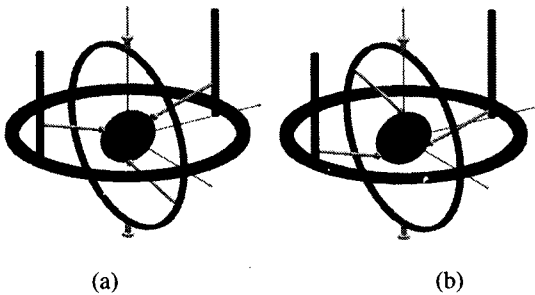


Fig. 14 Examples of the end-effector singular configuration of the Eclipse-II: (a) Point A in Fig. 5, (b) Point B in Fig. 5.

이클립스-II 에서 정기구학 자코비안의 컨디션 수를 조사함으로써 엔드이펙터 특이점 위치를 찾으면, Fig. 13 과 같다. Fig. 13 에서 x 축은 플랫폼의 경사각, y 축은 고정 좌표계의 Z 축으로의 병진운동을 나타낸다. 어둡게 나타난 부분이 엔드이펙터 특이점 상태로, Fig. 14 에서는 이런 상태의 예를 보여준다.

플랫폼이 엔드이펙터 특이점 상태에 도달하면, 무한히 많은 역기구학 해가 존재하게 된다. 즉, 플랫폼의 한 자세에 대해 능동조인트 값들의 무한히 많은 조합이 가능하다. 역기구학 해를 하나로 정하더라도, 플랫폼이 0°에서 360°까지 회전하면서, 조인트가 무한대의 속도를 갖거나 칼럼끼리 서로 충돌하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제는 엔드이펙터 특이점 순간에 역기구학 해를 바꿔줌으로써 해결할 수 있다.

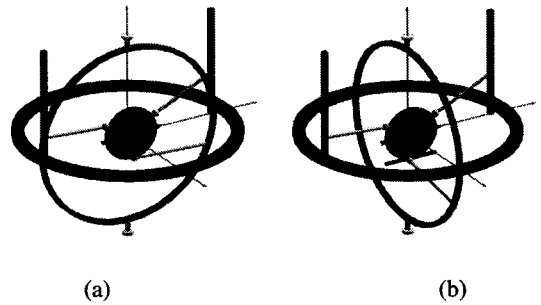


Fig. 15 Y-direction motion of the Eclipse-II: (a) 6 d.o.f Eclipse-II and (b) 7 d.o.f Eclipse-II

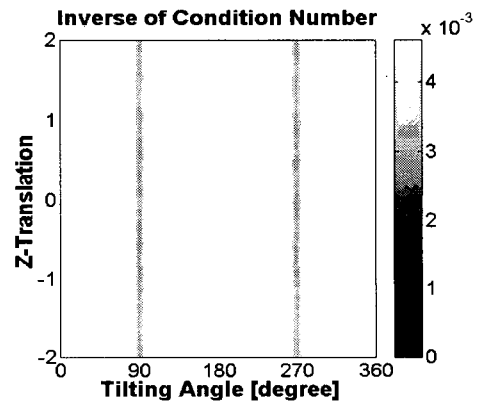


Fig. 16 Condition number plot of the end-effector singularity configuration of the 7 d.o.f Eclipse-II

그러나, Fig.15(a)와 같이 여전히 엔드이펙터 특이점에서 운동 좌표계의 y 축으로는 플랫폼이 움직일 수 없다. 따라서 Fig.15(b)와 같이 원형칼럼과 연결된 볼조인트의 위치를 바꾸는 액추에이터를 추가하였다. 즉, 자유도를 추가한 것이다. 자유도를 추가함으로써, 엔드이펙터 특이점 자세에서 원형칼럼을 움직이지 않고, 수직칼럼과 연결된 볼조인트의 위치만을 바꿈으로써 y 축으로도 플랫폼이 움직일 수 있다. 수학적으로 확인하면, Fig.16 에서 보이는 바와 같이 경사각 90°와 270°에서 컨디션 수가 급격히 줄어들어 엔드이펙터 특이점이 제거된 것을 알 수 있다.

4.2 작업영역

이클립스의 경우와 마찬가지로 이클립스-II 의 작업영역을 나타내면 Fig.17 과 같다. 작업영역은 지름 120 mm, 높이 170 mm 의 원기둥 형태이다.

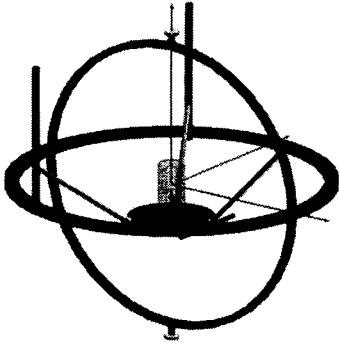


Fig. 17 Original workspace of the Eclipse-II mechanism

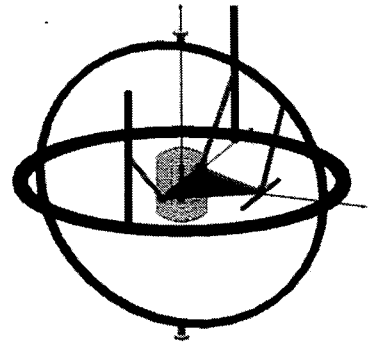


Fig. 18 Optimized workspace of the Eclipse-II mechanism

원형 가이드와 원형칼럼의 크기를 고정하고, 작업 영역이 최대가 되도록 기구 변수들을 최적화하면, Fig.18 과 같은 작업영역이 나온다. 처음의 경우에는 세 볼조인트가 정삼각형의 꼭짓점에 있었으나, 최적화된 경우는 이등변 삼각형의 세 꼭짓점에 놓이게 된다. 또한 운동 좌표계도 정삼각형의 중심에서 이등변 삼각형의 밑변의 중심으로 이동하게 된다. 최적화된 변수는 다음과 같다. 이등변 삼각형의 밑변은 480 mm, 높이는 570 mm 이고, 원형칼럼과 연결된 링크의 길이는 700 mm, 수직칼럼과 연결된 링크의 길이는 890 mm 이다. 최적화 후, 작업영역은 지름 340mm, 높이 260 mm 로 증가한다.

5. 결론

본 논고에서는 새로운 병렬기구 플랫폼인 이클립스와 이클립스-II 를 소개하였다. 이클립스 플랫폼을 응용할 경우, 기존 스텐더트-고흐 플랫폼에 의해 형성된 시장을 대체하는 것 뿐만 아니라, 새로운 수요를 창출하는 것이 가능해진다. 즉, 공작기계 산업에서는 기존 병렬기구 공작기계보다 더욱 리드타임을 획기적으로 단축하는 즉석가공이 가능한 새로운 개념의 공작기계를 개발할 수 있게 된다. 한편, 항공 산업에서는 기존의 비행 운동재현기의 단점인 경사각 한계를 해결해서 더욱 일반적인 모든 운동을 재현할 수 있는 비행 운동재현기를 출현시킬 수 있다. 그러나 가장 큰 응용분야는 앞으로 엄청난 규모로 성장할 게임 산업이다. 이클립스 플랫폼을 기본구조로 해서, 기존 게임기의 개념과는 전혀 다른 가상현실 재현 첨단게임기

들을 개발할 수 있기 때문에, 지금까지 상상을 하지 못했던 새로운 게임 및 오락 산업을 창출할 수 있다. 또한 MEMS 기술에 응용을 할 경우, 현재 기술의 한계인 2.5 차원 형상의 부품 가공으로부터 3 차원 형상의 부품의 직접가공을 가능하게 하는 마이크로 공작기계 및 마이크로 조립스테이션의 기본구조로 활용될 수 있다.

참고문헌

1. 유선중 외, "이클립스: 쾌속 가공을 위한 병렬기구," 대한기계학회논문집, 제 23 권, 제 3 호, pp. 425-433, 1999.
2. Jongwon Kim et al, "Eclipse-II: A New Parallel Mechanism Enabling Continuous 360-degree Spinning Plus Three-axis Translational Motions," IEEE Transactions on Robotics and Automation (submitted)
3. D. Stewart, "A Platform with six degrees of freedom," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 180, Part I, No. 15, pp. 371-386, 1966.
4. F. C. Park and J. W. Kim, "Singularity Analysis of Closed Kinematic Chains," ASME J. of Mechanical Design, Vol. 121, pp. 32-38, 1999.
5. Jinwook Kim et al, "Performance analysis of parallel manipulator architectures for CNC machining," 1997 ASME IMECE Symposium on Machine Tools, Dallas, U.S.A., Vol. 6.2, pp. 341-348, 1997.