

Eclipse : 쾌속가공을 위한 새로운 병렬기구 기계

김 종 원, 박 종 우

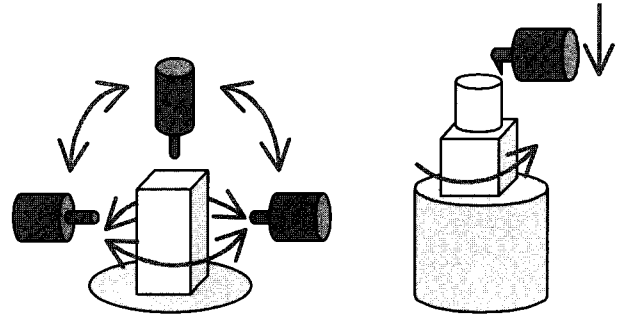
서울대

1. 서론

제품의 시장주기가 빨라짐에 따라 쾌속가공은 제품의 경쟁력을 위해 점점 더 중요해지고 있다. 여기서 '쾌속'이란 원재료에서 부품을 완성하는 가공시간이 매우 단축됨을 말한다. 쾌속가공은 특히 최종제품을 위한 여러 가지 원형을 제작하고자 할 때 필요하다. 가공시간을 최소화하기 위해서는 가공물의 설치를 변경하지 않아야 한다. 원재료가 일단 공작기계에 올려지면 공작기계는 설치를 바꾸지 않고 가공물의 모든 5면을 가공할 수 있어야 한다. 여기서 5면은 각재에서 윗 면과 네 측면을 지칭한다.

기존의 수치제어공작기계(CNC)는 일반적으로 공구축(spindle axis)의 방향에 의해 수직형과 수평형으로 나누어진다. 대다수 공작기계는 공구축이 한 자세로 고정되어 있어 각재의 5면을 가공하기 위해서는 1번 이상 설치를 변경해야 한다. 5면 가공용 plano miler가 사용되나 공작기계의 베드나 수직축(column) 같이 비교적 큰 가공물의 가공에 이용되는 특별한 기계이다.

기존의 공작기계가 한 번의 설치로 5면을 가공하기에는 적합하지 않으므로 쾌속가공을 목적으로 새로운 구조의 공작기계를 고안해야 한다. 새로운 공작기계가 가져야 할 선결조건은 다음과 같다. 첫째, 공구스핀들(tool spindle)이 수직에서 수평자세로 임의의 각도로 기울일 수 있어야 한다. 둘째로 Fig. 1(a)에 보이듯 공구스핀들이 공작물의 측면을 360도 이상 선회하며 가공할 수 있어야 한다. 공구스핀들이 공작물의 측면을 선회하며 가공하면 B축 회전 테이블이 필요하지 않다. 이점은 Fig. 1(b)에서와 같이 가공물 테이블에 다른 스피들(spindle unit)을 장착하여 수직 선삭 작업을 가능하게 한다. 더군다나 기계의 강성이 충분히 크면 공구스핀들과 가공물스핀들(workpiece spindle)의 회전으로 연삭 작업이 가능하다. 이러한 방식으로 새로운 공작



(a) Five-face milling (b) Vertical turning

Fig. 1. Prerequisites for rapid machining.

기계는 가공에 필요한 모든 작업을 수행하고 설치 변경 없이 가공물의 모든 5면을 가공할 수 있다.

위에서 제안된 개념은 기계의 설계에 병렬기구 구조를 적용하여 실현할 수 있다. Stewart-Gough Platform 같은 병렬기구구조는 수치제어 공작기계의 기본 구조로써 공작기계 제작사의 주목을 얻고 있다[1]-[4]. 몇몇 공작기계 제작사들(Gidding & Lewis, Ingersoll, Geodetics, Hitachi Seiki 등)이 병렬구조기반의 상용공작기계를 개발해 왔고, 더 많은 제작사들이 이에 동참하고 있는 추세이다.

그러나 지금까지 제안된 병렬구조 공작기계는 쾌속가공을 위한 선결 조건을 충족시키지 못하고 있다. 이것은 공구스핀들의 수직자세에서 최대 경사각이 30도를 넘지 못하기 때문이다. 선결조건을 만족시키기 위해서는 경사각이 90도 이상이어야 한다.

이점에 착안하여 본 저자는 쾌속가공을 위한 선결조건을 만족시키는 새로운 병렬기구 이클립스(Eclipse)를 고안했다. 이클립스 시작품은 이미 개발되어 새로운 구조로써 성능을 검증받았다. 현재, 실제 기계가 파리에서 열리는 국제공작기계전시회 EMO' 99에 출품하기 위해 제작되고 있다.

본 논문은 이클립스를 기반으로 하는 새로운 병

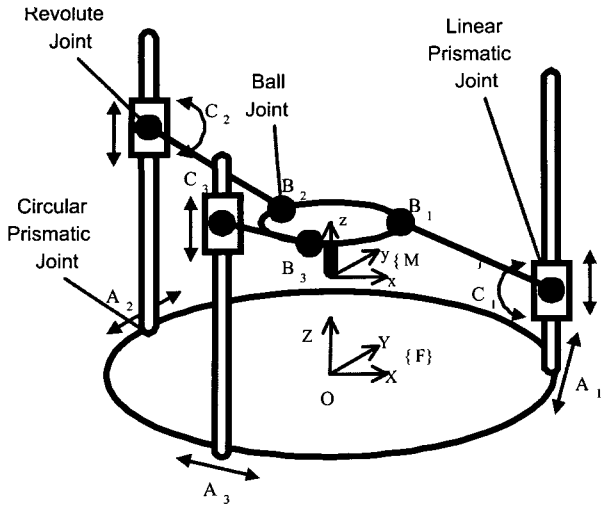


Fig. 2. Basic structure of the Eclipse mechanism.

렬기구 공작기계의 전체적인 구조, 세부 설계적인 측면, 그리고 성능 평가에 대해 다루고 있다.

2. 이클립스 기구의 구조

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 이클립스는 고정된 원형가이드상에서 각각 독립적으로 움직일 수 있는 세 개의 PPRS 직렬연쇄구조로 이루어져 있다. 여기서 P, R, S는 각각 미끄럼 조인트, 회전 조인트, 볼 조인트를 지칭한다. 기구는 6 자유도를 가지고 8개의 구동 조인트가 있다. 기본적으로 6 자유도 기구 구조를 가지면서 8개의 구동 장치가 필요한 이유는 본 논문의 후반부에 설명할 것이다. 이러한 8개의 구동 조인트는 원형가이드를 따라 세 개의 미끄럼 조인트, 수직축(column)의 세 개의 미끄럼 조인트 그리고 2개의 수직축에 있는 회전 조인트이다.

원형가이드 위에 각각의 직렬연쇄구조를 장착하여, 이클립스가 위치와 자세에서 큰 작업공간을 가지도록 설계되었다. 공구스핀들은 수직에서 수평 자세로 연속적으로 움직일 수 있고 임의의 자세에서도 Z축에 대해 360도 회전할 수 있다. 이러한 운동은 5면 가공을 위해 필수적이다.

한가지 흥미로운 점은 대다수 Stewart-Gough Platform 방식의 전형적인 대칭 구조 설계와는 달리 연쇄구조중 하나의 연결링크가 이클립스 시작품에서는 공구플랫폼(spindle platform) 아래쪽으로 부착되어 있어(Fig. 3) 공구플랫폼의 뒤편으로 돌출되어 있는 스핀들모터와 연결링크가 간섭하지 않게 설계되어 있다. 이클립스의 공구스핀들이 90도 경사 가능함을 Fig. 3에서 볼 수 있다. Fig. 3(a)

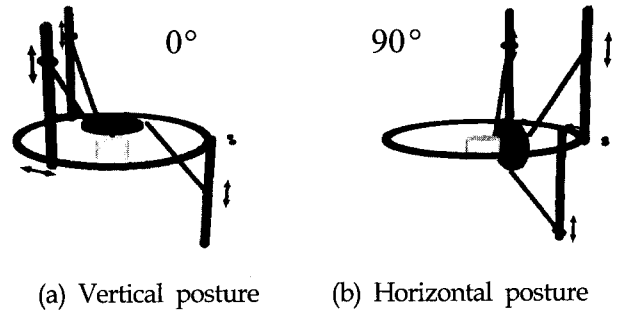


Fig. 3. Mechanism adapted in the Eclipse prototype design.

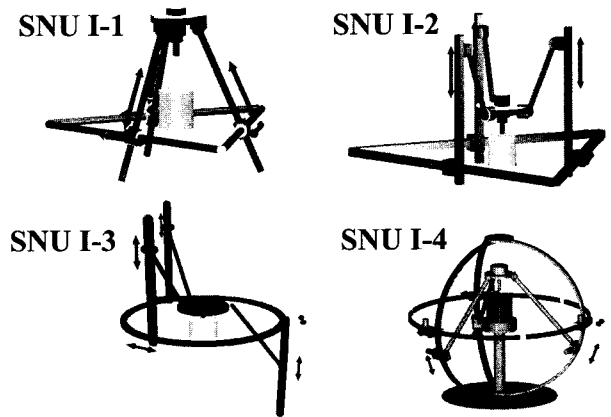
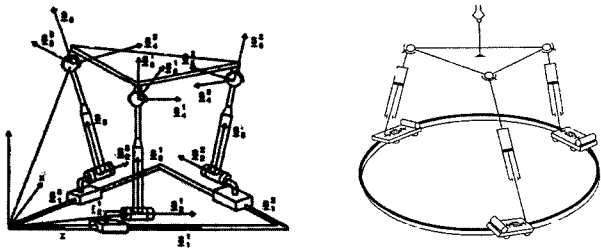


Fig. 4. Eclipse candidates during the conceptualization stage.

에 이클립스의 초기 위치(Home Position)가 나타나 있는데 공구플랫폼은 수직자세로 주어진다. Fig. 3(b)처럼 세 개의 수직축이 원형가이드를 따라 나란히 위치하면 공구플랫폼은 90도로 기울어진 수평자세에 도달한다.

이클립스에 사용되는 원형가이드는 기존 공작기계에 쓰이는 직선가이드에 비해 제작과 조립이 어렵다. 링기어와 피니언은 원형가이드 상에서 수직축을 원하는 위치로 이송하기 위해 이용된다. 또한 이송을 안내하기 위한 원형가이드용 베어링 시스템과 원형베드에 대한 설계가 필요하다. 본 시스템에 적용되는 구조는 기존 공작기계의 설계구조와 큰 차이가 있다.

기구 구조를 개념화하는 단계에서 현재의 원형가이드 대신 직선가이드를 이용하는 몇 가지 설계안을 시도했었다. 이런 안들이 Fig. 4에 보이는 SNU I-1 과 SNU I-2 의 후보 설계이다. 그러나 운동 모의실험의 결과 Fig. 2의 볼-소켓 조인트(B1, B2, B3)의 회전각의 한계로 실제로 90도 경사가 가능하지 않았다. 이러한 과정을 통해 세 개의 독립



(a) Behis mechanism [5] (b) Alizades mechanism [6]

Fig. 5. Parallel mechanisms related to the Eclipse.

적인 직선 가이드로는 90도 경사 자세를 얻을 수 없다는 결론에 이르렀다. 그래서 이클립스로 이름 지어진 SNU I-3의 설계에서는 원형가이드를 채택하지 않을 수 없었다. 후보 설계안 SNU I-4는 직선이던 수직 축을 원형으로 변경하여 얻어졌다. 이 기구도 90도 경사가 가능하나 부품의 가공과 조립의 제작적인 측면에서 문제점을 지니고 있다.

실제로, SNU I-1의 기구구조가 Fig. 5(a)에 보이는, Behi[5]가 제안한 구조와 동일하다는 점을 최근에 알게 되었다. 또한 SNU I-3기구, 이클립스가 Fig. 5(b)에 보이는, Alizade et al[6]가 제안한 기구와 유사함을 주목할 필요가 있다. 두 기구의 차이점은 Alizade의 구조가 세 개의 PRPS 직렬연쇄구조임에 비해 이클립스는 세 개의 PPRS 직렬연쇄구조이다. 더구나 그들은 제안한 기구를 90도 경사운동에 이용할 수 있는 가능성에 대해서 언급하지 않았다.

3. 이클립스 시제품의 개발

시제품은 Fig. 6에 보이는 바와 같이 이클립스가 실현 가능한 구조를 가지고 있는지를 검증하기 위해 만들어졌다.

이클립스는 3개의 수직축으로 이루어져 있는데 그것들은 각각 독립적으로 지름 500mm와 600mm의 원형가이드 베어링을 따라서 미끄러져 움직인다. 작업공간은 $\phi 100 \times 100$ 이고 공구 끝의 최대 선속도는 1.5m/min에 달한다. 링기어와 피니언 기어 시스템에 의해서 3개의 수직축이 원형 가이드를 따라서 움직인다. 그리고 서보모터가 각각의 피니언에 직접적으로 물려있다. 각각의 수직축은 그 위에 이송장치를 가지고 있는데 이 이송장치는 수직축 방향의 직선 가이드 베어링을 따라서 수직으로 움직인다.

이송장치의 운동은 서보모터와 볼스크류 이송시

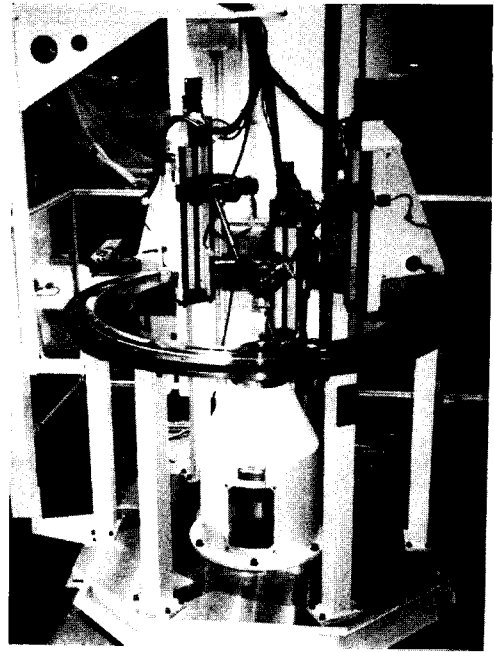


Fig. 6. Overall view of the Eclipse prototype.

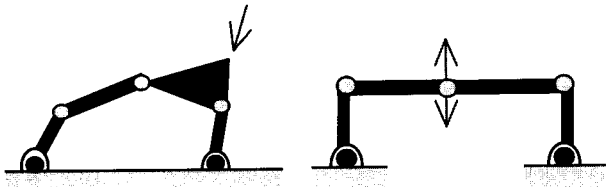
스템에 의해서 구현된다. 연결링크의 한 쪽은 각각의 수직축에 있는 이송장치에 핀 조인트로 연결되어 있으며 연결링크의 반대쪽에는 볼-소켓 조인트로 공구플랫폼에 연결되어 있다. 그리고 공구스핀들(tool spindle)이 공구플랫폼(spindle platform)의 중앙에 부착되어 있다. 이 공구스핀들 모터는 밀링과 보링 공구를 모두 돌릴 수 있다. 이클립스 시제품에는 또한 가공물스핀들(workpiece spindle)이 기계의 중앙지점에 놓여 있는데 가공물은 이 스펀들의 끝부분의 테이블에 맞물려서 고정된다.

수직 선삭 공정의 경우 가공물스핀들이 회전하여 가공물을 돌리게 되고 반면에 공구스핀들은 돌아가지 않도록 고정되어 있다. 이러한 방식으로 밀링과 선삭 공정이 하나의 동작기계 구조에서 동일한 작업공간을 가지며 실행된다.

이클립스 설계의 초기단계에서는 이 시스템이 6자유도 장치이기 때문에 6개의 서보모터로 충분하리라고 예상되었다. 즉 3개의 서보모터가 3개의 수직축을 원형가이드를 따라서 구동시키고 나머지 3개의 서보모터가 수직축위에 있는 이송장치를 수직축을 따라서 이동시킨다.

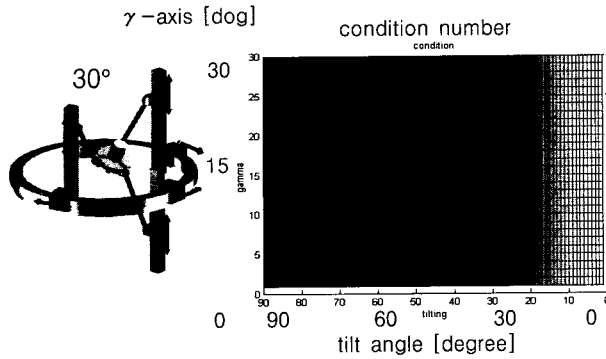
그러나 6개의 서보모터를 장착한 초기의 이클립스 시제품은 공구스핀들의 90도 경사가 불가능한 아주 심각한 문제점이 드러났다. 이 문제는 주로 이 기구의 특이점에 기인한다.

병렬기구에 있어서 특이점(Singularity)은 크게 2가지 종류로 분류되는데 '말단장치기'(end-effector)



(a) End-effector singularity (b) Actuator singularity

Fig. 7. Two types of singularities.



(a) Actuator singularity (b) Condition number plot

Fig. 8. Actuator singularities of the Eclipse prototype.

와 '구동장치'(actuator) 특이점이다(자세한 사항은 [7]을 참조). 말단장치기 특이점의 경우 이 기구의 공구는 하나 또는 그 이상의 자유도를 잃게 된다. 반면에 구동장치 특이점의 경우에는 공구가 하나 또는 그 이상의 자유도를 얻게 된다(즉, 기구의 자유운동이 일어난다). Fig. 7은 2차원의 5링크 시스템의 경우에서 특이점 분류의 물리적인 의미를 보여주고 있다. 검은색 점은 구동장치를 나타낸다.

6개의 서보모터를 장착한 초기의 이클립스 시제품은 30도와 60도 주위의 경사 각도에서 구동장치 특이점을 보였다. Fig. 8(a)은 이클립스의 구동장치 특이점의 한 위치를 보여주고 있다. Fig. 8(b)는 공구플랫폼의 운동범위가 0도에서 90도의 경사일 때 최초의 이클립스 시제품의 Condition Number(정의는 [7]을 참조)를 도시하고 있다.

그림에서 30도와 60도 주위의 어두운 영역은 특이점을 나타내고 있다. 그 중에 하나는 Fig. 8(a)에서 나타내고 있는 구동장치 특이점을 나타내고 있다. 이러한 이유로 이클립스 초기 시제품은 초기 위치에서 90도 경사 위치로의 이동에 실패했고 그 반대도 마찬가지이다. 우리는 또한 모의 실험을 통해 Fig. 5(b)의 Alizade의 기구 또한 40도 경사위치 주위에서 똑같은 구동장치 특이점을 지니고 있음

(a) Actuator singularity (b) Over-actuated mechanism

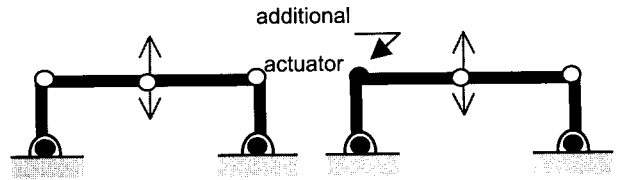


Fig. 9. Avoidance of the actuator singularity problem.

을 알았다. 그러나 그들은 특이점의 문제에 대해서 어떤 언급도 하지 않았다.

이러한 구동장치 특이점을 피하기 위해 2개의 구동장치가 각각 이송장치에 있는 핀 조인트에 추가로 장착되었다. 하나는 아래쪽의 수직축에 또 하나는 2개의 위쪽 수직축 중 하나에 장착되었다.

이 구동장치 특이점은 이러한 추가된 구동장치에 의해서 완전히 제거되었고 그 결과로 과구동 이클립스 시제품이 되었다. 이 추가된 구동장치는 구동장치 특이점에서 공구플랫폼을 원하는 경로를 따라 움직이도록 한다. 유사한 개념이 Fig. 9에서도 보여지고 있다. Fig. 9에서는 3개의 구동장치가 Fig. 7(b)에서 보여지는 5링크 시스템 구동장치 특이점 문제를 해결하고 있다(이론적인 논의는 [7]참조). 과구동 이클립스 시제품은 성공적으로 원했던 90도 경사 성능을 보였으며 결과적으로 가공물의 한 번 설치로 5면 가공을 할 수 있음을 보였다. 또한 선삭과 밀링 공정이 하나의 기계에서 수행될 수 있음을 보였다. 이클립스는 6자유도 기구이기 때문에 어떠한 작업공간 범위에서도 3축 동시 가공이 가능하다. 이 과구동 이클립스의 시제품의 설계 목표는 새롭게 창안된 병렬기구의 성능을 검증하는 것이기 때문에 강성은 아직 이 단계에서의 주요 논의 대상은 아니다. 수직 자세에서 강성은 주축방향과 반경방향에 대해서 각각 $1.2N/\mu m$ 와 $0.6 N/\mu m$ 이다. 수평 자세에서의 강성은 주축방향과 반경방향에 대해서 각각 $1.5N/\mu m$ 와 $3.0N/\mu m$ 이다. 이 정도의 강성으로 우리는 단지 플라스틱 시편을 가공할 수 있었다.

4. 이클립스의 개발

일단 이클립스의 성능이 검증된 후에 실제 기계가 설계되고 현재 제작 중에 있다. 강성은 어떤 자세에서도 $50N/\mu m$ 에 도달하는 것으로 계산 되었다. Fig. 10은 이클립스의 정면에서 본 모습이다. 원형가이드의 기본직경은 2.000mm이다. 작업공간은 $\phi 300 \times 200$ 이다. 공구끝단의 최대 이송속도는

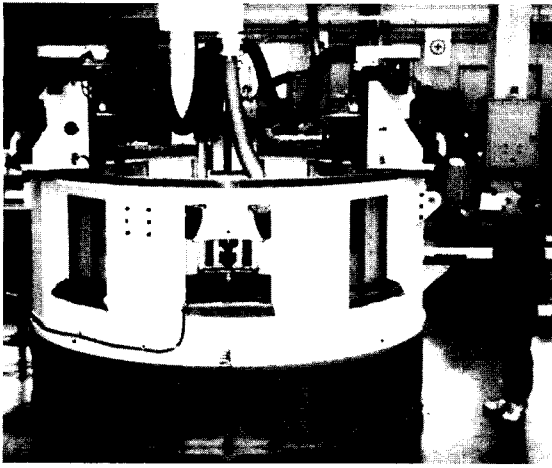


Fig. 10. Front view of the Eclipse machine.

10m/min이다.

실제기계는 이클립스 시제품과 비교할 때 3가지의 특별한 점이 있다.

(1) 모든 3개의 수직축은 기저의 링에서 위쪽 방향으로 뻗어있고 서로 동일하다. 반면에 시제품은 하나의 수직축은 아래쪽 방향으로 뻗어있다.

(2) 강성을 높이기 위해 볼 소켓 조인트를 유니버설 조인트로 대체했다.

(3) 기계 제어부가 개방형 구조의 PC 기반 CNC로 이클립스를 위해서 특별히 제작되었다.

우리는 파리에서 열리는 EMO'99 국제공작기계 전시회에 모든 시스템을 출품할 계획이다.

5. 결론

새로운 병렬기구 이클립스가 제시되었다. 이클립스를 기반으로 하는 공작기계는 공구스핀들을 수직자세에서 90도 기울어지도록 하며 이로 인해 한 번의 설치로 각재의 윗 면 뿐만이 아니라 네 측면의 가공을 가능하게 한다. B축 운동은 필요가 없다. 그러므로 밀링 공정에 더해 가공물스핀들을 테이블에 추가 장착함으로써 선삭 공정도 가능하다. 또한 기계의 작업공간에서 5축의 동시가공이 가능

하다. 이클립스는 30도와 60도 주위의 각도에서 생기는 특이점을 피하기 위해서 과구동된 기구이다. 모든 대칭적인 6자유도 병렬기구가 이러한 공통된 구동장치 특이점 문제를 가짐을 합리적으로 추론할 수 있다. 이 기구를 검증하기 위한 과구동된 이클립스 시제품은 성공적으로 실험을 마쳤다. 현재, 이클립스 공작기계가 제작 중에 있다. $\phi 300 \times 200$ 의 작업공간과 함께 $50N/\mu m$ 의 강성이 예상된다.

6. 후기

본 연구는 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터(ERC-ACI)에서 지원하였다.

참고문헌

- [1] Valenti, M., 1995, Machine Tools Get Smarter, ASME Mechanical Engineering, 117/11: 70-75.
- [2] Kim, J. W., Park, C., Kim, J., Park, F. C., 1997, Performance Analysis of Parallel Manipulator Architectures for CNC Machining, Proceeding of the ASME IMECE'97, 6/2: 341-348.
- [3] Warnecke, H-J, Neugebauer, R., Wieland, F., 1998, Development of Hexapod Based Machine Tool, Annals of CIRP, 47/1: 337-340.
- [4] Pritschow, G, Wurst, K-H, 1996, Systematic Design of Hexapods and other Parallel Link System, Annals of CIRP, 46/1: 291-295.
- [5] Behi, F., 1988, Kinematic Analysis for a Six-degree-of-freedom 3-PRPS Parallel Mechanism, IEEE J. of Robotics and Automation, 4/5: 561-565.
- [6] Alizade, R. I., Tagiyev, N. R., Duffy, J., 1994, A Forward and Reverse Displacement Analysis of a 6-DOF In-parallel Manipulator, Mechanisms and Machine Theory, 29/1:115-124.
- [7] Ryu, S. J., Kim, J. W., Hwang, J., Park, C., Cho, H. S., Lee, K., Lee, Y., Cornel, U., Park, F. C., Kim, J., 1998, Eclipse: An Over-actuated Parallel Mechanism for Rapid Machining, Proceeding of the ASME IMECE'98, 8: 681-689.