

기계가공로봇의 설계, 제어 및 프로그램에 관한 연구

박근우*(창원대 메카트로닉스공학부)

Study on Design, Control and Program of a parallel manipulator for machining work

K. W. Park(School of Mechatronic, Changwon Nat'l Univ.)

ABSTRACT

In this paper, I propose double parallel manipulator for machining work. And I derive an kinematics by combining the kinematics of the central axis and the kinematics of the link train of linear actuator. The Jacobian of the central axis and the Jacobian of the link train of the linear actuators are induced by a motor algebra and they are combined to an entire Jacobian matrix to transform the velocity of the end effector to those of linear actuators. And then this paper presents the development of control system and user interface program for machining work.

Key Words Machining work (기계가공작업), Double Parallel Manipulator (2단 병렬기구), Control Program(제어 프로그램), GUI Program(GUI 프로그램)

1. 서론

본 논문은 기계 가공 작업 자동화를 위한 적합한 머니퓰레이터의 설계하고 이를 실제 시스템으로 구현하는 연구이다. 이 작업은 분진과 소음으로 작업 환경이 매우 열악하여 작업자들이 기피하는 대표적인 업종이다. 따라서 관련업체에서는 작업환경을 개선하기 위해서 로봇을 이용한 자동화를 추진하고 있다. 그러나 이러한 가공작업은 로봇 머니퓰레이터의 장성이 커서 가공 작업시 변형과 진동이 적어야 하며 작업공간이 커서 다양한 형상의 가공물을 다룰 수 있어야 한다. 대표적인 고강성 머니퓰레이터에 관한 연구로 Gough가 처음으로 개발한 것을 Stewart¹ 가 변형한 스튜어트 플랫폼이 있다. 이 기구는 Hunt² 에 의해서 장단점이 분석되고 Fichter³ 등에 의해 기구학과 동역학 해석이 완성됨으로써 실용화되었다. 본 논문에서는 기계 가공작업에 적합한 2단 병렬기구⁴를 제안하며 이를 제어하기 위한 기구학 해석 및 자코비안을 유도한다. 또 실제 구현된 시스템을 3차원 미지형상가공에 적용하기 위한 제어기를 개발하고 일반사용자들을 위한 사용자 인터페이스 프로그램을 개발한다.

2. 기계 가공 머니퓰레이터

2.1 머니퓰레이터의 설계

기계 가공 작업을 위한 2단 병렬기구 머니퓰레이터를 Fig. 1과 같이 제안한다. DPM은 2개의 베이스와 플랫폼 그리고 중앙축으로 되어 있다. 첫째 단(first parallel mechanism : First PM)에는 3개의 리니어 액추에이터, (LA_1, LA_2, LA_3)로 이루어져 있으며 각 리니어 액추에이터의 양단에는 유니버설 조인트가 설치되어 베이스-1(base-1)과 플랫폼-1(platform-1)에 각각 연결되어 있다.

중앙축은 머니퓰레이터의 중앙에 있으며 한 몸체로 되어있는 플랫폼-1과 둘째 단(second parallel mechanism : Second PM)의 베이스-2(base-2)를 축을 따라 이동하게 하는 가이드 역할을 한다. 둘째 단은 2개의 리니어 액추에이터(LA_4, LA_5)로 이루어져 있으며 첫째 단과 길이 양단에 설치된 유니버설 조인트가 베이스-2(base-2)와 플랫폼-2(platform-2)에 각각 연결되어 있다. 마지막 회전 액추에이터 (A6)는 플랫폼-2에 설치되어 그립퍼의 회전운동을 담당한다.

이 기구는 각 단의 운동이 서로 독립적으로 행해

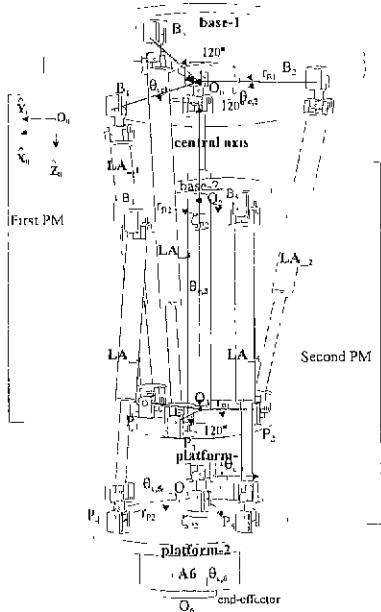


Fig. 1 Double Parallel Manipulator

지므로 다관절 로봇과 같이 위치와 자세 운동이 분리된다 즉, 첫째 단은 둘째 단을 공간상에 위치시키는 기능을 하며 둘째 단은 플랫폼-2의 각도를 조절함으로써 그립퍼의 요(yaw)와 피치(pitch)운동을 생성한다. 롤(roll)운동은 플랫폼-2에 설치되어 있는 A6의 회전운동으로 행해지는데 이 운동만이 유일하게 회전 액추에이터에 의한 직접 구동이고 나머지 운동은 리니어 액추에이터의 길이 조절에 의한 간접 구동이다.

병렬기구의 기구학적 구조의 특성을 분석하기 위해 Gosselin이 제안한 parallelism의 정도⁵를 도입하면 2단 병렬기구의 parallelism 정도는 75%로 넓은 작업 공간의 직렬기구의 장점과 고 강성의 병렬기구의 장점을 가지는 기구가 된다.

2.2 기구학 해석

2단 병렬기구의 특징은 운동을 구속하는 중앙축이 있다는 것이다. 중앙축은 Fig. 1과 같이 베이스-2를 중앙축을 따라 이동하게 함으로써 베이스-2와 한 몸체로 되어 있는 플랫폼-1의 운동과 플랫폼-2의 운동을 연결해 주는 역할을 한다. 그러므로 기구의 운동이 중앙축의 관절의 운동으로 표현되어 운동해석이 간단해진다.

중앙축 기구학 해석(kinematics)은 일반 다관절로 가정하고 D-H방법을 이용하여 구하면 아래와 같다.

$$(\overrightarrow{O_0O_6}, {}^0R_6) = \aleph_c(\theta_c) \quad (1)$$

$$\theta_c = \aleph_c^{-1}(\overrightarrow{O_0O_6}, {}^0R_6)$$

여기서 $\overrightarrow{O_0O_6}$ 은 좌표 {0}와 좌표 {6}사이 거리벡터.

0R_6 은 좌표 {6}의 자세를 나타내는 회전행렬 Θ_c 는 중앙축 피동 파라미터 ($[\theta_{c,1}, \dots, \theta_{c,6}]$), $\aleph_c(\cdot)$ 와 $\aleph_c^{-1}(\cdot)$ 은 각각 중앙축의 정/순방향 기구학 함수이다 그러나 식 (2)에서 다루는 값들은 피동 파라미터로 직접 제어가 불가능하다. 그러므로 제어가 가능한 능동 파라미터, 즉, 리니어 액추에이터의 길이를 첫째 단과 둘째 단

$$\begin{aligned} {}^0B_iP_i &= {}^0O_0O_3 + {}^0R_3 {}^3O_3P_i - {}^0O_0B_i \quad (i=1, 2, 3) \\ {}^5P_iB_i &= {}^5O_5O_2 + {}^5R_2 {}^2O_2B_i - {}^5O_5P_i \quad (i=4, 5) \end{aligned}$$

로 각각 구함으로써 기구학 해석이 완료된다

2.3 자코비안 해석

자코비안은 속도제어를 위해서는 필수적이다⁶. 일반 병렬기구의 자코비안 J 는 아래와 같이 플랫폼의 속도 $[V_P \ \Omega_P]^T$ 를 리니어 액추에이터의 속도 $([\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dots \ \dot{\theta}_6]^T)$ 로 변환하는 행렬로 정의된다

$$[\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dots \ \dot{\theta}_6]^T = J_{(6 \times 6)} [V_P \ \Omega_P]^T \quad (3)$$

그러나 2단 병렬기구에서는 플랫폼의 속도를 2개 또는 3개뿐인 링크에 전달해야 하므로 식 (3)과 같이 직접 변환될 수 없다. 본 논문에서는 모터의 원리⁷를 이용하여 각 단의 구속운동을 포함한 자코비안을 유도한다. 각 조인트의 모터는 단위속도와 플랫폼의 결과 속도로 정의되는데 i -링크 트레인의 j -조인트 θ_{ij} 가 단위 속도로 구동될 때 플랫폼에 부여된 점 O 의 회전 및 선 속도를 Vel_O 로 나타내면

$$Vel_O = \dot{\theta}_{ij} {}^0M_1 + \dot{\theta}_{ij} {}^0M_2 + \dots + \dot{\theta}_{ij} {}^0M_d \quad (4)$$

로 표현된다. 여기서 ${}^0M_{ij}$ 는 6×1 의 베열로, i -번째 링크 트레인의 j -번째 조인트가 단위 속도로 구동될 때 출력 링크의 회전속도와 점 O 의 선속도의 합으로 정의되는 단위 베열이다. 그리고 점 j 는 자유도이고, $\dot{\theta}_{ij}$ 는 j -번째 조인트의 속도이다.

2단 병렬기구의 자코비안을 구하기 위해서 중앙축 Vel_P_c 와 j -번째 능동 링크 트레인 끝단의

Vel_P_i 는 각각

$$Vel_P_c = {}^P_j f_c \ \dot{\theta}_c \quad (5)$$

$$Vel_P_i = {}^P J_i \dot{\theta}_i \quad (6)$$

이고 여기서

$$\begin{aligned} {}^P J_c &= [{}^P M_{c,1} \cdots {}^P M_{c,n}], \quad \dot{\theta}_c = [\dot{\theta}_{c,1}, \dots, \dot{\theta}_{c,n}]^T \\ {}^P J_i &= [{}^P M_{i,1} \cdots {}^P M_{i,6}], \quad \dot{\theta}_i = [\dot{\theta}_{i,1}, \dots, \dot{\theta}_{i,6}]^T \end{aligned}$$

이다 식(5)와 (6)을 종합하면

$$[\dot{\theta}_{13} \dot{\theta}_{23} \dot{\theta}_{33} \dot{\theta}_{43} \dot{\theta}_{53} \dot{\theta}_6] = AB {}^O J_c^{-1} Vel_O_6 \quad (7)$$

이다 여기서 A_s 와 B_s 는 각각 6×16 과 16×6 행렬로

$$A = \begin{bmatrix} {}^P S_s^T & & & & & \\ & {}^P S_s^T & & & & \\ & & {}^P S_s^T & & & 0 \\ & & & {}^P S_s^T & & \\ & 0 & & & {}^P S_s^T & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} [{}^P J_c]_V & & & & & \\ [{}^P J_c]_V & & 0_{(9 \times 3)} & & & \\ [{}^P J_c]_V & & & & & \\ & & [{}^P J_c]_V & 0_{(3 \times 1)} & & \\ 0_{(7 \times 3)} & & [{}^P J_c]_V & 0_{(3 \times 1)} & & \\ & & & 0_{(1 \times 2)} & & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 여기서 ${}^P S_s = \overrightarrow{B_i P_i} / \| \overrightarrow{B_i P_i} \|$ 이고 결과적으로 Vel_O_6 을 각 리니어 액추에이터의 속도로 변환하는 2단 병렬기구의 자코비안은 아래와 같다.

$$J = A B {}^O J_c^{-1} \quad (8)$$

3. 미지형상가공을 위한 제어기

기계가공 중의 대표적인 연삭작업에 개발된 기구를 적용한다 일반적으로 연삭 대상물은 매우 복잡하고 다양한 형상을 지니고 있다 이러한 다양한 형상은 자동화를 이루는데 많은 문제를 일으킨다 이러한 문제점을 극복하기 위해서 비전 센서, 전류 센서를 사용한다.

미지의 형상 표면의 연삭 경로를 추적하기 위해 3차원 형상을 X-Y 수평면과 X-Z 수직면으로 분리하고 각 면의 경로를 측정 및 예측한다. 즉, Fig. 2와 같이 제어기를 구성하여 수평면의 경로는 비전 센서가

인식하고, X-좌표에 대한 경로의 y-점을 칼만 필터를 이용해 미리 예측한다. 동시에 수직면에 나타나는 경로의 높낮이는 가공 툴에 제공되는 전류를 이용하여 인식하고, x-좌표에 대한 z-점은 Lagrange 보간법에 의해 예측한다 예측된 점으로 가공 툴을 이동시키기 위해 접선(tangential), 측선(lateral) 및 법선(normal) 방향의 속도를 찾아낸다 3-방향의 속도를 더한 합성 속도를 가공 툴의 속도로 하고, 이를 생성하기 위한 각 리니어 액추에이터의 속도를 자코비안에 의한 속도 변환으로 구한다. 이때 가공 툴의 현재 위치를 알아내기 위한 순방향 기구학 해석도 실시간으로 처리된다.

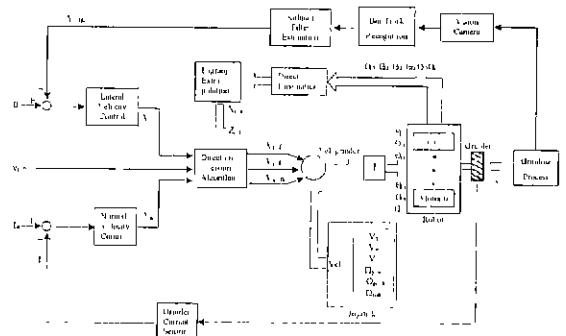


Fig. 2 Components of control system

4. 연구결과

미지 형상 표면의 연삭 작업을 위해 Fig. 3과 같이 병렬기구 마니퓰레이터와 제어시스템을 구현하였고 Fig. 4(a)와 같이 높낮이 변화가 심한 3차원 곡면에 연삭 경로를 표시하고, 그라인더가 그 경로를 따라 일정한 부하를 유지하면서 연삭 작업을 수행했다.

X-Y방향으로 웨이브를 따라간 결과는 Fig. 4(b)와 같다 약간의 오차를 가지고 실제 곡선을 추적함을 알 수 있다 0에서 50mm 사이는 연삭 경로가 뚜렷하지 않아 곡선의 중심선을 정확히 인식을 하지 못 함으로써 좌우로 심하게 움직인 것을 알 수 있다 비전과 기구의 부정확한 보정도 오차를 유발한다 X-Z방향의 기울기를 추종한 결과는 Fig. 4(c)와 같다. 또, 그라인더를 접선방향으로 진행시키고, 법선 방향으로 밀어주므로 수평면, 오르막에서 실제 웨이브를 정확히 따라가고 기울기가 급격히 변하는 곳을 제외하고는 Fig. 4(d)와 같이 일정한 부하를 갖는다.

그리고 이러한 일련의 작업을 일반사용자들이 기구에 쉽게 명령할 수 있도록 그래픽-사용자 인터페이스(Graphic User Interface GUI) 방식으로 응용 프로그램을 Fig. 5와 같이 개발하였다 특히 개발된 응용 프로그램은 사용자가 Block Command Window내에 준비되어 있는 세부 명령을 마우스로 끌어다

Command Edit Window에 배치하여 프로그램을 작성할 수 있도록 하였다.

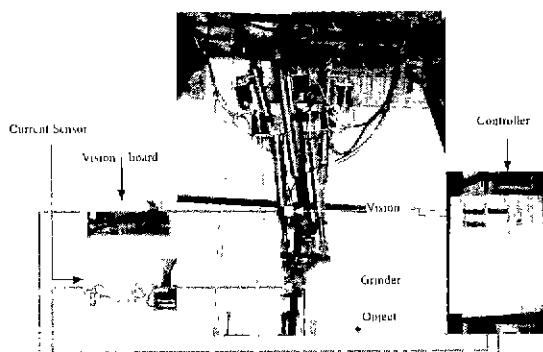


Fig. 3 Parallel manipulator and control system constructed for grinding work

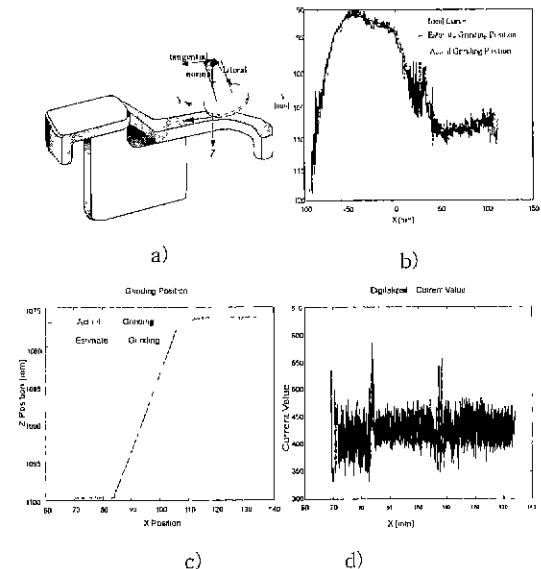


Fig. 4 a) 3-D Workpiece b) Trajectory of x-y plane
c) Trajectory of x-z plane d) Current value

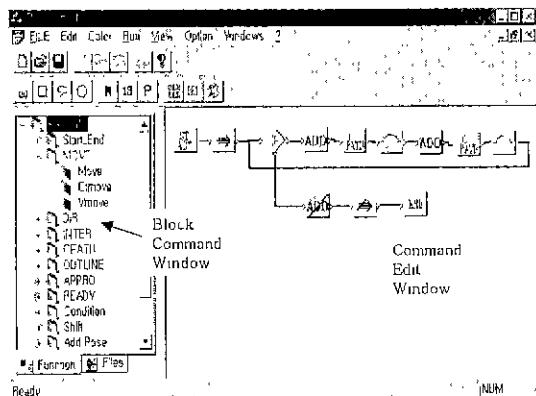


Fig. 5 An example application program

4. 결론

본 논문에서는 기계 가공작업에 적합한 병렬기구 머니플레이터를 설계하였다. 개발된 병렬기구 머니플레이터를 제어하기 위한 역방향/순방향 기구학 해석을 위한 일고리즘을 개발했다. 또, 속도제어를 위한 자코비안을 모터액터를 이용하여 유도함으로써 액추에이터가 2개 또는 3개일지라도 속도변환이 가능하도록 했다.

제작된 시스템을 미지형상가공작업에 적용하기 위한 x-y, x-z 방향 제어기를 분리하여 구성하고 이를 실제 가공 작업에 적용하였다. 그리고 일반 사용자들이 가공 작업을 쉽게 할 수 있도록 그래피 사용자 인터페이스 프로그램을 개발하였다.

참고문헌

- 1 Stewart, D., "A Platform with Six Degrees of Freedom," Proc Instn Mech. Engrs, London, vol 180, Pt. 1, no 15, pp 371-386, 1965
- 2 Hunt, K. H., "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms", ASME J of Mech Transm Automat Design, vol. 105, pp 705-712, 1983
- 3 Fichter, E F, "A Stewart Platform-Based Manipulator. General Theory and Practical Construction", Int. J. of Robot Res., vol. 5, pp 157-182. 1986
- 4 Lee, M. K. and Park, K. W "Kinematic and Dynamic Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities". IEEE Trans. Robot Automat., vol.15, no 6, pp 1024- 1034. 1999.
- 5 C Gosselin, 1988, "Kinematic analysis, optimization and programming of parallel robotic manipulators," Ph. D. dissertation, Dept. of Mechanical Eng., McGill Univ., Montreal, Canada
- 6 Mohamed, M. G. and Duffy, J , "A Direct Determination of the Instantaneous Kinematics of Fully Parallel Robot Manipulators," ASME J Mech Transmiss. Automat Design, vol 107, pp 226-229. 1985
- 7 Sugimoto, K., "Kinematic and dynamic analysis of parallel manipulators by means of motor algebra." J Mech Transm. Automat Design, vol 109, pp 3-7, 1989