

論文94-31B-9-6

마크로-마이크로 로봇의 제어에 관한 연구

(A Study on the Control of Macro-Micro Robotic Systems)

朱晋華*, 明志泰*, 朴義烈**, 李章明**

(Jin Hwa Ju, Ji Tae Myoung, Ui Yul Park and Jang Myoung Lee)

要約

본 논문에서는 작업 수행에 있어서 로봇의 작업공간의 제약에 구애를 받지 않고 다양한 일을 수행할 수 있는 잉여로봇 실현의 한 방법을 제시한다. 이 실현은 하나의 마크로 로봇과 또 하나의 마이크로 로봇을 직렬로 연결함으로써 가능하게 된다. 상용의 목적으로 설계된 5자유도를 갖는 마이크로 로봇이 사용되었으며, 이 마이크로 로봇은 그 기저 프레임이 적절한 위치에 놓이면 다양한 일들을 수행할 수 있는 특성을 갖고 있다. 이 마이크로 로봇의 기저 프레임은 본 연구에서 설계 제작된 3자유도를 갖는 마크로 로봇에 의하여 적절한 위치로 놓여지게 된다. 이 잉여로봇 시스템에 할당된 하나의 작업을 수행함에 있어서 마이크로 로봇만의 동작으로 수행이 불가능하거나 작업 효율이 떨어지는 경우에 마크로 로봇이 동시에 제어되어야 한다. 작업 수행중의 마이크로 로봇의 작업 효율은 Manipulability를 사용하여 나타내었으며, 두 로봇의 협동적 제어에 의하여 이 마이크로 로봇의 작업 자세 효율이 높게 유지될 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통하여 보였다.

Abstract

In this paper, we demonstrate how to design a redundant robot which is suitable for the multiple task execution without any constraints on the work space. The implementation is possible by the rigid connection of a macro-robot and a micro-robot. A 5 d.o.f articulated robot designed for commercial purpose is utilized as a micro-robot which can perform a general task with the appropriate adjustment of its base location. The base of a micro-robot is located at a suitable position by the macro-robot designed and implemented through this research. A task assigned to this redundant robot is performed mainly by the micro-robot. However, when the micro-robot cannot perform the task by itself or when the micro-robot has difficulties in performing the task, the coordination of the macro-robot is required. To monitor the task execution efficiency of the micro-robot, we used the 'Manipulability Measure' as a cost function. The coordination between the two robots are verified both by the simulation and the experiment.

*正會員, **正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan Univ.)

* 이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술

진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술
연구 조성비에 의하여 연구 되었음.

接受日字 : 1994年 1月 4日

I. 서론

기존의 6축의 기저가 바닥면에 고정된 로봇 매니플레이터의 경우 6자유도를 가지고 있어 로봇의 End-Effector의 위치(Position/Orientation)를 임의로 형성할 수 있도록 되어 있으나 실제적으로는 작업 공간내에서의 관절각의 제한, Singularity 제약 및 장애물로 인한 제약으로 인해서 작업의 효율이 저하되거나, 작업자체를 수행할 수 없는 경우가 종종 발생된다. 이에 로봇의 모든 작업이 주위 작업 환경과의 접촉(Contact)상태에서 이루어 지므로 관절 부위의 유지 측면 및 하나의 로봇에 다양한 작업의 수행이 요구되어 진다는 점을 감안하고 제어와 사용 편의성을 함께 고려하면서 로봇의 성능 향상을 위한 방법을 연구하게 되었다. 특히 로봇의 작업중 특이자세 (Singular Configuration)부근의 위치로의 이동이 요구되는 경우에는 기구학적으로 볼때 그 이후의 자세 형성에 큰 오차가 발생할 뿐만 아니라 큰 관절 토크가 요구되는 등 제어의 어려움이 따르게 된다. 이러한 6축 이하 로봇의 활용상의 단점을 개선하기 위해 최근에는 7축 이상의 다관절 로봇을 활용하여 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행되어져 오고 있다. 이러한 잉여 로봇은 기존의 6축의 매니플레이터에 Revolute (또는 Prismatic)조인트를 Serial로 연결하거나 Stewart Platform과 같은 Parallel Manipulator등의 다양한 형태로 연구되어져 오고 있다.^[1,4] 이러한 잉여도는 로봇 Arm의 활용면에서 많은 장점을 가지고 있다 - 특이 자세의 회피(Singularity Avoidance), 충돌 회피(Collision Avoidance), 기계적 부위의 효과적 사용, Manipulability의 증대, 등 -.^[4] 최근에는 고정식의 작업 로봇의 베이스를 이동 Frame으로 두어 Moving Base를 가진 작업 로봇의 활용이 주목되고 있으며 이러한 형태의 잉여 로봇에 대한 연구가 또한 진행되어져 오고 있다. 이러한 작업 로봇의 베이스의 이동은 작업 로봇의 작업 공간을 크게 넓혀주며 로봇의 자세의 개선과 특이자세의 회피등에 활용되어 질 수 있다. 이러한 Moving Base를 사용하는 경우, 상부의 기존의 작업 로봇을 마이크로 로봇 (Micro Robot)라 하며, 하부의 움직임은 베이스를 제공하는 로봇을 마크로 로봇 (Macro Robot)라 칭한다. 이러한 마크로-마이크로 로봇의 개념을 가진 로봇 시스템은 또한 다양한 형태를 갖고 있는 것이 많다.^[1,6]

본 논문에서 다룬 마크로-마이크로 로봇은 차륜에 의한 X-Y-Z방향으로 이동 가능한 이동 로봇을

마크로 로봇으로, 기존의 5축의 5자유도를 갖는 작업 로봇을 마이크로 로봇으로 활용하여 이 작업 로봇을 이동 로봇의 상단에 장착, Serial로 결합한 형태로서 구성한 것이다. 특히 이러한 구성은 작업의 특성에 맞는 다양한 작업 로봇을 마이크로 로봇으로 활용하면서도 각각 독립된 제어기로서 운용되므로 적은 비용으로 다양한 잉여 로봇 시스템을 구성할 수 있다는 장점들을 가지고 있다. 마이크로 로봇은 5축의 기존의 로봇을 이용하였고 마크로 로봇은 자체에서 설계, 제작한 이동로봇을 이용하여 그 실현예를 보이며, 끝으로 이 마크로-마이크로 로봇 시스템의 활용예를 들어 그 성능을 평가해 보고자 한다.

II. 마크로-마이크로 로봇의 제어시스템

1. 마크로-마이크로 로봇의 키네마틱

마크로 로봇과 마이크로 로봇은 각각 독립적으로 제어 되는 시스템이지만 두 시스템을 하나로 묶어서 제어하기 위해서는 하나의 시스템으로 해석, 제어하여야 한다. 그림 1에는 본 연구에서 사용된 마크로-마이크로 로봇 시스템의 Cartesian Space상에서의 링크 좌표계의 형성도를 나타내었다.

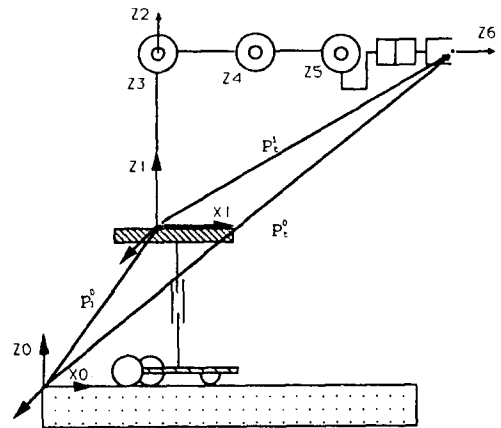


그림 1. 마크로-마이크로 로봇의 링크 좌표계의 형성도

Fig. 1. Link Frames of Macro-Micro Robot System.

그림 1에서 보듯이 마크로 로봇은 X-Y-Z방향으로의 움직임을 가진 3축 개별 구동의 3자유도 로봇으로 볼 수 있다. 그러나 일반적으로 이동 로봇은 그 자코비안이 Closed Form으로 구해지기 어려우며,

따라서 이동 방향의 각 Case별로 구분하여 키네마틱을 구하는 방법이 사용되어졌다.^[10] 그림 1에서는 마크로 로봇의 각 축에 대한 조인트 변수 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ 에 의해서 형성되는 마크로 로봇의 End-Effector의 위치(마이크로 로봇의 베이스)인 $P_1^0 = [Px \ Py \ Pz]^T$ 를 Frame(1)으로 설정하였다. 여기서 P_1^0 은 World Frame(0)를 기준으로 Frame(1)까지의 위치벡터이다. 마크로 로봇의 기능은 결국 마이크로 로봇의 베이스의 위치 (Px, Py, Pz)를 결정지어 주는 기능을 수행한다. 한편, 마크로 로봇의 키네마틱 해석은 참고문헌 [10]에 상세히 기술되어 있으며, 결합된 마크로-마이크로 로봇의 키네마틱은 참고문헌 [3]에 유도되어져 있다.

2. 마크로-마이크로 로봇 제어 시스템의 구성

각각의 로봇은 모두 개별 조인트 제어가 있고 상위의 주제어기에서 두개의 시스템을 동시에 제어하는 계층구조를 형성하고 있다. 그림 2에는 마크로-마이크로 로봇 제어 시스템의 구성을 나타내었다.

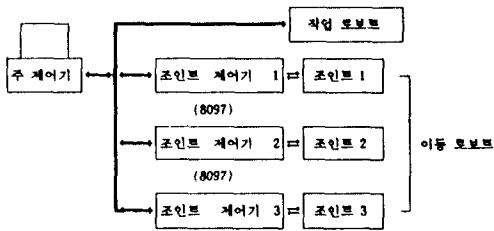


그림 2. 마크로-마이크로 로봇 제어시스템의 구성
Fig. 2. Architecture of Macro-micro Robot control system.

마크로-마이크로 로봇의 End-Effector에 대한 공간상의 위치가 결정되면 주 제어기 (IBM-PC)에서는 마이크로 로봇의 자세를 고려하여 각 조인트 변수를 역기구학 방정식(Inverse Kinematic)에 의해 구한다. 한편, 그 때의 베이스에 대해 역기구학 방정식을 이용, World-Frame에 대해서 마크로 로봇의 위치를 해석해 줌으로써 필요한 각 조인트의 회전값을 구한 후 주 제어기에서 마크로-마이크로 로봇의 각 조인트 제어기에 Trajectory Planning에 따른 지령값을 전송해 주게 된다.

마이크로 로봇은 5축의 스테핑 모터에 1개의 마이크로 프로세서가 조인트 제어기로 사용되어진 시스템으로서 주 제어기로부터는 Point-to-Point방식에 의해 위치 이동에 필요한 각 조인트의 스텝수를 계산

해서 단방향 데이터 버스 (Uni-Directional Data Bus)를 통해 전송받는 형태이다. 한편, 자체 제작된 마크로 로봇은 3축 구동을 위해 3개의 DC서보모터를 사용하였고 각 모터마다 개별 조인트 제어를 부착하였으며 Continuous Path Control을 위해 주제어기로부터 Trajectory Planning에 의해 계산된 궤적 지령값의 연속적 추종이 가능하게 구성되어져 있다. 주제어기로부터 계산된 마크로마이크로 로봇의 각 조인트의 회전값은 마이크로 로봇으로 스테핑 모터의 최종 회전 스텝수로 전송되어지고, 마크로 로봇으로는 Continuous Path를 형성하는 값으로 매 전송주기(Ts)마다 각 조인트 제어기로 전송된다. 이에 따라 각 조인트 제어기는 주어진 궤적 오차를 추종하게 된다. 한편, 전송된 궤적 지령값의 추종 결과를 다시 주 제어기로 전송해 줌으로서 주 제어기에서 궤적 오차를 Monitoring해 실시간에 궤적 오차를 보상하는 피드백 제어루프를 이루도록 마크로 로봇과 주제어기 사이에는 각 제어기별로 양방향 데이터 버스를 연결한 인터페이스 부분을 두었다.

III. 마크로 로봇 시스템

본 연구에서의 마크로 로봇은 그 자체로서 독립된 이동 로봇로서 설계되어져 범용의 이동 로봇의 특징을 가진 시스템으로 해석할 수 있다.

1. 마크로 로봇 시스템의 구성

마크로 로봇 시스템은 크게 Control Box Unit, Mechanical Robot, Interface Unit, 그리고 상위 주제어기의 4부분으로 나눌 수 있다. 그림 3은 마크로 로봇 시스템의 구성 블록을 나타내었다.

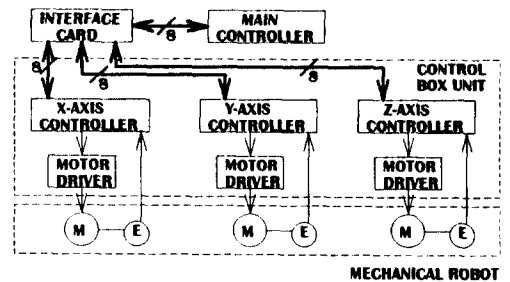


그림 3. 마크로(이동)로봇 시스템의 블록도
Fig. 3. Block Diagram of Macro(Mobile) Robotic System.

마크로 로봇의 외형(Mechanical Robot)은 참

고문헌 [10] 에서 설계, 제작된 형태로 3개의 모터의 개별 축 제어방식의 구조이다. 매크로 로봇의 Control Box Unit는 3개의 축을 각각 제어하기 위한 3장의 개별 조인트 제어가 On-Board형태로 구성되어져 Slot형태로 확장성을 고려해 제작되었다. 그림 3에서 보듯이 개별 조인트 제어기마다 모터 구동부가 함께 설계되어져 있으며 위치센서로는 인크리멘탈 엔코더를 사용하였다. 각 조인트 제어기는 상위 주제어기와의 Data의 전송을 위한 Bus Interface Card를 공유하며 각 제어기마다의 입,출력 데이터 라인을 갖고 있다. 여기에 모터 구동 회로의 전원과 각 디지털 전원까지 포함해 매크로 로봇의 전체 시스템을 구성하고 있다.^[11]

2. 이동 로봇 시스템의 제어 알고리즘과 프로그래밍

매크로 로봇은 개별 축 제어기와 각각의 개별 축을 전체적으로 제어하는 주제어기의 두개의 계층 구조로 구성되어 있으며 매크로 로봇의 주행을 위해서 개별 축 제어기는 속도 제어 피드백 루프와 더불어 위치 오차를 피드백에 의해 보상하는 피드백 루프를 가지고 있다. 여기서 개별 축 제어기의 속도 제어 알고리즘과 상위 주제어기에서의 매크로 로봇의 주행과 위치 이동을 위한 Task Planning 단계에서의 프로그래밍에 관해서 살펴본다.

(1) 개별 축 제어기의 속도 제어 알고리즘

여러가지의 다양한 제어 알고리즘이 있으나 안정하면서 소프트웨어적인 구현이 간단한 PD제어 알고리즘을 채택하였다. 그림 5에서 보듯이 개개의 조인트의 제어기에서는 주제어기로부터 주어진 지령값에 대한 현재 상태의 실제 회전량의 차이인 위치 오차의 크기에 따른 속도 지령값을 모터 구동회로의 입력으로 인가하므로 PD제어 알고리즘에 따라 이 오차를 비례성분과 미분 성분의 각 항에 적당한 비례 계수 K_p , 미분 계수 K_d 를 곱하여 계산된 출력을 구동회로의 입력으로 인가하게 된다. 다음은 이러한 PD제어 알고리즘에 따른 제어입력 $U(k)$ 의 계산 처리과정을 Flow Chart로 나타내었다.

- $C(k)$: 현재 읽어들이는 카운터의 값(펄스수)
- $C(k-1)$: (k-1) 시간의 카운터의 값(펄스수)
- θ_{ref} : Step 지령값
- $R(k)$: Step 입력으로부터 k시간까지 누적된 펄스수
- $D(k)$: k시간과 k-1 시간사이의 변화량(펄스수)
- $U(k)$: 제어 입력
- TC : 샘플링 주기

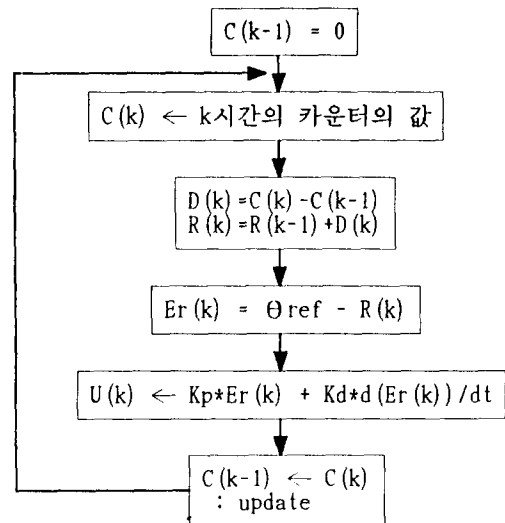


그림 4. 제어기의 제어 알고리즘

Fig. 4. Control Algorithm of Joint Controller.

한편, PD제어를 위해서는 모터를 포함한 플랜트 전체의 모델링이 선행된 후에 그 적절한 K_p 와 K_d 가 구해질 수 있으나, 로봇 시스템 전체의 모델링이 용이하지 않은 어려움이 있으므로, 실험적인 방법에 의해 K_p 와 K_d 를 적절히 조정하는 방식을 취하였다.

(2) 주제어기와의 통신

개별 축 제어기가 Step입력에 대한 추종을 수행하므로 주제어기에서는 매크로 로봇의 주행과 위치제어를 위해 적절한 시간간격(T_s)를 고려한 Step지령값들을 개별 제어기로 전송해 준다. 여기서 T_s 는 개별 제어기의 한 Step입력의 추종이 완료된 상태를 기준으로 설정, T_s 시간후에 또다른 Step입력을 전송하게 된다. 이렇게 주 제어기로부터의 지령값을 받아들이기 위해서는 적절한 데이터 처리 루틴이 필요하게 된다. 8097에서는 이러한 데이터의 처리를 제어 알고리즘의 실행 루틴상에서는 정기적으로 행할 수 없으므로 주제어기로부터의 데이터의 통신은 인터럽트 루틴을 통해 처리하도록 하였다.

(3) Trajectory Planning

각 개별 축에 대한 속도와 위치제어를 행하는 것은 각 바퀴의 회전제어에 의해 End-Plate의 위치를 원하는 임의의 Cartesian Space상의 한 점으로 이동시키는데 있다. 이를 위하여 주제어기에서는 로봇의 End-Plate를 임의의 위치(P_x, P_y, P_z)에 위치시키기 위해서 필요한 각 축의 회전량 (1, 2, 3)을 매크로 로봇의 역키네마틱에 의해 구해낼 뿐 아니라

이렇게 얻어진 회전량에 따라 로봇트를 기동-주행-정지를 위해 각 회전량의 시간적인 Profile을 정하여 그 값들을 로봇트의 각 축에 전송해 주게 된다. 또한 이 과정에서 전송된 양과 읽혀들어온(피드백된)회전량을 비교, 그 오차 또한 보정하는 일들을 수행한다. 이를 순서적으로 나타내 보면

- i) (P_x, P_y, P_z, ϕ_z) 가 주어진다. ϕ_z 는 기준 Frame에 대한 이동 로봇트의 Z축 방향으로의 회전각
- ii) 현재 로봇트의 위치 (P_{x0}, P_{y0}, P_{z0}) 와 목표지점 (P_x, P_y, P_z) 를 고려하여 역키네마틱에 의해 회전후의 위치 $P1(P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})$, 직진후위치 $P2(P_{x2}, P_{y2}, P_{z2})$, z를 고려한 회전후 위치, 곧 최종 위치인 $P3(P_{x2}, P_{y2}, P_{z2})$ 를 구한다.
- iii) $P1$ 으로의 이동을 위한 $\theta_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, $P2$ 으로의 이동을 위한 $\theta_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, $P3$ 으로의 이동을 위한 $\theta_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 를 각각 구한다.
- iv) 속도 Profile을 적절히 정하고 여기에 따라서 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 Trajectory(시간적 변화량)을 구한다.
- v) $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 순차적으로 전송하는데, 여기에 로봇트의 위치이동지령 데이터 전송시 피드백된 회전량을 비교, 그 오차를 보상하여 전송한다.

한편, v)의 과정에서 실시간에서의 Trajectory를 Display함으로써 K_p, K_d 를 조정하게 된다.

IV. 잉여 로봇트 시스템의 최적화

마이크로 및 마이크로 로봇트의 직렬연결에 의한 잉여 로봇트의 활용은 전체의 시스템을 하나로 보고 동시 제어를 하면서 그 작업효율을 향상시킬 수도 있으나, 본 연구에서는 마크로 로봇트가 여러 종류의 마이크로 로봇트를 그 End-Plate에 연결하여 사용할 수 있는 구조적인 목적에 비추어, 마이크로 로봇트의 작업 효율을 높이기 위하여 마크로 로봇트가 어떻게 활용될 수 있는가를 살펴 본다. 이를 위하여 마이크로 로봇트의 작업효율을 Manipulability를 사용하여 정의하고, 마이크로 로봇트의 작업 효율이 저하될때, 마크로 로봇트의 협동적 제어로 마이크로 로봇트의 자세를 수정하여 작업 효율을 높여주는 방법을 검토 하였다.

1. 마이크로 로봇트의 Manipulability 공간상의 주어진 End-Effector의 위치에 대한 로

보트의 자세가 달라지므로, 그에 따른 로봇트의 자세의 효율성도 달라진다. 이는 Manipulability Ellipsoid 로 기술되어 진다.^[5] 자코비안의 식

$$\dot{X} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (1)$$

로 부터 $\det(J) \neq 0$ 이면

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \dot{X} \quad (2)$$

식이 구해진다. 이 식에서,

$$\|\dot{\theta}\| = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dots + \dot{\theta}_5 \leq 1 \quad (3)$$

에 대한 (단위 조인트의 움직임에 대한) Cartesian Space상에서의 움직임은

$$\{\dot{X} : (JJ^T)^{-1} \dot{X}^T \leq 1\} \quad (4)$$

와 같이 m-차의 Hyper-Ellipsoid로 나타난다. 이때 이 Ellipsoid를 Manipulability Ellipsoid 라 정의한다.^[2] 이 Ellipsoid는 로봇트가 조인트 Space에서 일정한 조인트 Rate이내에서 움직일때 - 그 때 주어진 로봇트의 자세에 대해서 - Cartesian Space상에서는 어떤 방향으로는 효율적인, 또는 다른 방향으로는 비효율적인 동작이 발생된다는 것을 알려 주는 지수로 사용된다.^[2] 마이크로 로봇트의 자코비안을 $J(\theta)$ 라 할때 Cartesian Space 상에서의 속도와 조인트 Space상에서의 속도는 식 (5)과 같이 나타내어 진다.

$$\dot{X} = [V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T = J(\theta) [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5]^T \quad (5)$$

마이크로 로봇트의 특정 운동 성분을 갖는 작업에 이용하고자 한다면, 위의 자코비안 항들중에서 그 운동 성분항들을 이용하여, 2 또는 3차원상에서 Manipulability Ellipsoid의 모양을 그릴 수 있다.

2. 마크로/마이크로 로봇트를 이용한 실험에

마크로/마이크로 로봇트를 협동적으로 제어하는 예로 마이크로 로봇트만으로는 작업공간의 제약으로 인하여 수행될 수 없는 동작에 대한 협동적 수행의 예를 보였다. 사진 2에서 보듯이 벽면에 마이크로 로봇트의 작업공간을 벗어난 위치에 도달하기 위해서는 마이크로 로봇트는 그 베이스의 이동이 요구되며 이를 위해서 마크로 로봇트는 마이크로 로봇트의 작업

공간 이내의 적합한 지점으로 그 베이스를 위치시켜 주는 일을 하게 된다. 한편, 마이크로 로봇의 Work-Space 이내로 마이크로 로봇을 이동시키는데 있어서 마이크로 로봇의 자세에 따라 결정되는 Manipulability를 Cost Function으로 설정하고 이 값에 따라서 마크로 로봇과의 협동적 제어를 이루도록 하였다. 이를 순서대로 나타내보면 다음과 같다.

1) End-Effector의 위치(Position and Orientation, $[P_x P_y P_z \alpha \beta \gamma]$)가 결정되면 역기구학 방정식(Inverse-Kinematic)의 해, $[\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5]^T$ 를 구한다.

2) 구한 해에 의한 로봇의 자세에 따른 Manipulability Ellipsoid를 평가하여 그 주축의 비를 C. N(Condition Number)라 하고 이 값이 설정값 이내일 때는 마이크로 로봇의 End-Effector를 그 위치로 이동한다.

3) C.N의 값이 설정값보다 클 경우는 마이크로 로봇의 자세가 비효율적이므로 최적의 자세를 취하는 위치로 마이크로 로봇의 베이스(마크로 로봇의 End-Plate)를 이동시킨다. 이를 Flow Chart로 나타내면 아래와 같다.

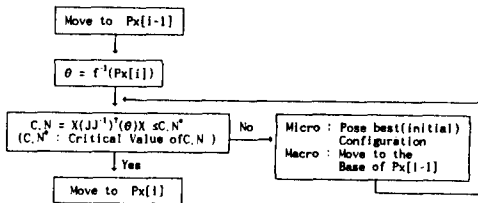


그림 5. 마크로-마이크로 로봇의 협동적 작업 수행 Flow

Fig. 5. Flow Chart of Macro-Micro Robot's Cooperation.

① 수행 작업

마크로-마이크로 로봇은 마이크로 로봇의 베이스로부터 $(0, 45, 33, \alpha=90, \beta=0, \gamma=90)$ 의 위치에서부터 시작. 초기 Orientation($\alpha=90, \beta=0, \gamma=90$)을 유지하면서 $(0, 44, 43) \rightarrow (30, 44, 43) \rightarrow (30, 44, 0) \rightarrow (-30, 44, 0) \rightarrow (-30, 44, 43) \rightarrow (0, 44, 43)$ 의 경로로 사각형의 Path를 Pen을 들고 따라간다.

② Simulation

그림 6에는 위치 이동을 평가하는 C.N*값의 설정에 따라 Path이동에 따른 C.N의 변화를 C.N*=1.37에 대해서 나타내었다.

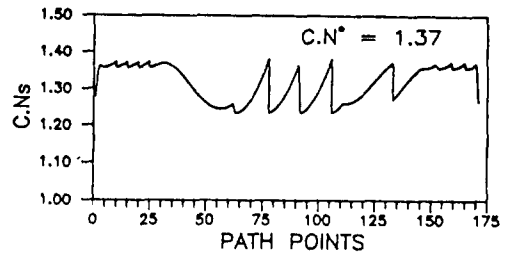


그림 6. C.N*=1.37에서의 전 Path에 대한 C.N의 변화

Fig 6. Variation of C.N* on the Whole Work Path at C.N*=1.37.

이로써 마크로-마이크로 로봇의 협동적 제어에 의하여 C.N의 값을 원하는 값 (1.37)이내로 유지할 수 있다.

③ 실험 결과

앞서 시뮬레이션한 결과를 실제 실험 과정을 통해 그 성능을 평가하였다.

(1) 실험 조건

- 마크로 로봇 End-Plate의 중심점의 위치 :
 - World Frame에 대해 $(0, 0, 678)$ (mm)
- 마이크로 로봇 End-Effector의 이동 경로 :
 - $(X, Z) = (-30, 43), (30, 43), (30, 0), (-30, 0)$ 의 네 점을 잇는 사각형
- Tool의 초기 자세 : $\alpha=90, \beta=0, \gamma=90$
- 이동 변위 : 1.25 (cm)

한편, 작업면은 Y축 방향으로의 여유를 두어 Tool (Pen)과의 마찰에 의한 마이크로 로봇의 탈조현상이 생기지 않게 설치하였다. 본 실험에서는 마크로 로봇의 이동은 X-Y방향만으로 한정한다.

(2) 결과

마크로-마이크로 로봇을 앞서의 시뮬레이션(C.N*=1.37)에 의해 제어를 수행한 경우 마크로-마이크로 로봇의 협동적 제어가 요구되는 점들을 그림 7에 나타내었다.

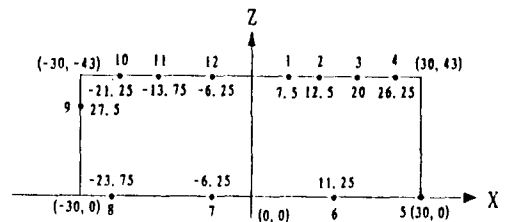


그림 7. X-Z평면상의 두 로봇의 협동적 제어점 Fig. 7. Cooperation-Occurring Points of Two Robots on the X-Z Plane.

그림 8에서는 그림 7의 1~12의 각 점에서의 마이크로 로봇과 매크로 로봇의 각각의 이동오차, 그리고 매크로-마이크로 로봇의 End-Effector의 위치와 설정 경로와의 오차를 평면상의 거리로 나타내었다.

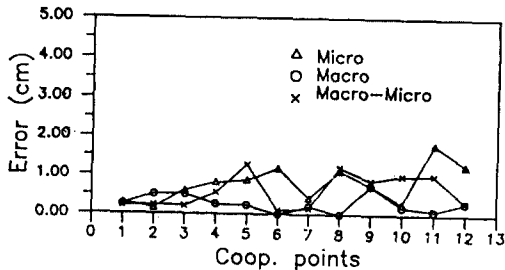


그림 8. 협동 제어점에서 매크로-마이크로 로봇의 이동오차

Fig. 8. Tracking Errors on the Cooperation Points of Macro-Micro Robot.

사진 1에는 위의 경로를 따라 매크로-마이크로 로봇이 이동할 때의 동작을 보여주며 X-Z평면상의 사각형을 그리는 작업을 나타내었다.

(3) 검토

시뮬레이션에서 사용한 것과 동일한 협동적 제어 수행의 지수로서 Manipulability Ellipsoid를 사용하여 마이크로 로봇의 자세를 효율적으로 유지시키



사진 1. 매크로-마이크로 로봇의 협동적 작업수행
Pic. 1. Cooperative Task Execution of Macro-Micro Robo.

면서 큰 작업 영역에서 매크로-마이크로 로봇이 효과적으로 활용될 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 본 연구에서는 매크로-마이크로 로봇의 위치 제어 측면보다는 매크로 로봇의 성능이 마이크로 로봇의 베이스를 제어하기에 적합한가에 초점을 두고 실험하였으며 전 경로를 이동하는 동안 실제 매크로 로봇의 추종 오차는 전체 작업에 있어서 그 값이 수 mm 이내로 유지되어 마이크로 로봇의 안정적인 베이스로 활용될 수 있었다. 본 연구에서 사용된 마이크로 로봇의 위치 제어 정도가 C.N의 값이 증가함에 따라 떨어지는 것을 확인하였으며, 정도가 높은 작업을 수행하기 위해서는 마이크로 로봇을 정도가 높은 것으로 대체하여야 할 것이며 또한 매크로 로봇의 다이내믹 특성을 고려한 제어 알고리즘의 실현이 연구되어야 한다.

V. 결론

본 논문에서는 3축의 3자유도를 갖는 X-Y-Z공간상의 임의의 점으로의 이동이 가능한 매크로 로봇과 기존의 5축의 5자유도를 갖는 마이크로 로봇을 결합, 8축의 잉여 다관절 로봇 시스템의 구성과 그 활용의 일례를 보였다. 이를 위해서 먼저 매크로 로봇 시스템을 설계, 제작하여 그 성능을 실험적으로 확인하였다. 매크로 로봇은 3개의 축에 대한 각 축의 개별 제어방식을 택하여 각 조인트별로 제어를 설계, 제작하였다. 개별 축의 제어기는 16Bit의 마이크로콘트롤러인 인텔사의 N8097BH를 이용하여 구현하였으며 3개의 축을 주 제어기에서 통합한 계층구조를 형성하였다. 개별축에 대한 제어는 PD제어를 사용하였고 실험적으로 제어상수를 구하였으며 그 성능을 보였다. 이렇게 구성된 매크로 로봇을 5축의 마이크로 로봇과 함께 주제어기 상에서 통합하여 제어함으로써 마이크로 로봇의 자세의 최적화를 위한 매크로 로봇과의 협동의 예를 보였다. 이를 위해서 Manipulability Ellipsoid를 자세에 따라 움직임의 효율을 나타내는 지수로 사용하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 제어 결과를 보였다. 매크로 로봇은 Mechanical 부분과 볼캐스터의 마찰 등을 고려할 때 여러 외란의 조건등이 있으나 PD제어기로도 비교적 정밀한 특성을 얻을수 있었고 이를 통해서 마이크로 로봇의 베이스로서의 역할을 충분히 수행할 수 있음을 보였다. 다양한 마이크로 로봇의 베이스를 이동해주기 위해서는 매크로 로봇 제어에 있어서 외란에 강한 제어 알고리즘의 연구 검토가 필요하다.

參 考 文 獻

- [1] H. Seraji : "Motion Control of Mobile Manipulators", Proc. IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp2056-2063, July 1993.
- [2] T. Yoshikawa : "Manipulability of Robotic Mechanisms", Proc. 2nd Intern. Symposium on Robotics Research, Kyoto, Japan, 1984.
- [3] S. Lee and Jang M. Lee : "Multiple Task Point Control of a Redundant Manipulator", IEEE Conf. on Robotics and Automation, May 1990.
- [4] K. K. Degaldo, M. Long, H. Seraji : "Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators", *Intern. Journal of Robotics Research*, Vol.11, No. 5, October 1992.
- [5] J. J. Craig : Introduction to Robotics-Mechanics and Control, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1986.
- [6] M. W. Spong and M. Vidyasagar : Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [7] D. G. Bihn : "Universal Six-Joint Robot Controller", *Control System Magazine*, pp31-35, Feb. 1988.
- [8] Intel Corporation : 16-Bit Embedded Controllers, Embedded Applications - Microprocessor and Peripheral Handbook, Vol. 2, O.N. 270250-005, Oct. 1990.
- [9] Intel Corporation : C-96 User's Guide for Dos System, O.N. 167632-002, Jan. 1987.
- [10] Intel Corporation : MCS-96 Macro Assembler User's Guide, O.N. 122048-001, Jan. 1983.
- [11] 주진화 : "이동용 Robot의 메카니즘 설계 및 해석", 동아대학교 전자공학과 석사학위 논문, 1992
- [12] 주진화, 명지태, 강동호, 이장명 : "다기능 잉여 로봇 시스템의 설계", 대한 전자공학회 부산, 경남지부 하계 종합 학술 발표회 논문집, pp 91-94, 1993. 6. 5
- [13] 주진화, 이장명 : "이동용 Robot의 메카니즘 설계 및 해석", 대한 전자공학회 추계 종합 학술대회 논문집, Vol. 15, 1992, 11
- [14] 명지태 : "마이크로-마이크로 로봇의 제어에 관한 연구", 부산대학교 전자공학과 석사학위 논문, 1993
- [15] J-P. Merlet : "Direct Kinematics and Assembly Modes of Parallel Manipulators", *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 2, April 1992.

— 著 者 紹 介 —



朱 晋 華 (準 會 員)

1964年 9月 17日生. 1990年 2月 부산공업대학교 전자공학과 졸업. 1993年 2月 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993年 3月 ~ 현재 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정 중. 주관심 분야는 이동로봇 시스템 설계 및 제어 등임.



明 志 泰 (準 會 員)

1969年 10月 3日生. 1992年 2月 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994年 2月 부산대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994年 8月 삼성항공주식회사 연구원. 주관심 분야는 로봇 시스템의 설계 및 제어 등임.

— u 著 者 紹 —



李 章 明(正會員)

1957年 11月 22日生, 1980年 2月
서울대학교 전자공학과(공학사).
1982年 2月 서울대학교 전자공학
과 대학원(공학석사). 1990年 12
月 USC(남가주대학) 박사학원 취
득(Computer Engineering 전

공). 현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 조교수.
주관심 분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제
어, μ -processor 응용 시스템 설계, Motor 구동방
식 및 제어 등임.

朴 義 烈(正會員) 第 28卷 A編 第 5號 參照

현 부산대학교 공과대학 전자공학과
정교수