제어기가 분리 설계된 매크로/마이크로 로봇의 공동작용 제어

Coordinated Control of a Macro/Micro Robot with Separate Controllers

황 정 훈, 권 동 수
(Jung-Hun Hwang and Dong-Soo Kwon)

Abstract : A coordination method for a macro/micro robot with separate controllers is proposed and evaluated. The macro/micro robot system generally has independent controllers for the macro and the micro robot, respectively. A controller for the coordination of the macro and the micro robot has been designed based on the stable independent controller of each system. The method for maintaining the micro robot within its workspace is proposed as a proper coordinated control method, and trajectory generation method is also proposed to track the moving desired position rapidly. The control strategy has been implemented to the macro/micro robot system to evaluate the performance. The experimental results show that the proposed method for maintaining the micro robot within its workspace has uniform performance over the various range of the bandwidth, and the proposed trajectory generator is shown to be efficient

Keywords : macro/micro, coordinated control, serial/parallel manipulator, industrial robot

I. 서론

로봇의 사용범위가 다양해지고 있는 요즘, 로봇을 전문수술의사 수준의 기술을 요구하는 미세수술이나 숙련공 이 요구되는 정밀조립 작업등의 분야에도 이용하려는 연구가 이루어 지고 있다. 미세수술 이나 정밀조립 작업들의 특징을 보면, 미세수술의 경우 환부의 손상을 줄이기 위해 수십 마이크로의 위치정밀도와 수십 그램 수준의 힘제어가 요구되며, 정밀조립작업의 경우 작은 부품을 구멍에 삽입하는 등의 작업은 작은 범위에서 많은 자유도를 요구하는 동작 및 수십~수백 마이크로 이내의 위치 정밀도와 미세한 힘 제어가 요구된다. 이러한 요건을 만족하기 위해 로봇은 작은 관성항(low inertia), 높은 제어 대역폭(high control band-width), 높은 위치분해능 및 작업영역을 포함할 수 있는 작업공간(workspace)을 가져야 한다. 이러한 필요성을 모두 만족시키기 위해 매크로/마이크로 로봇시스템이 제안되었다[1, 5, 6, 7, 8, 12].

매크로/마이크로 로봇에 관한 연구 중 성능에 대한 연구에서 Khatib는 매크로/마이크로 로봇의 작업공간 관성항의 크기는 마이크로 로봇의 것과 같거나 작을 수 있음을 보였고[1,2] 로봇의 동적성능은 말단장치의 관성 및 가속성분에 좌우된다고 하였다[3]. 그리고 매크로/마이크로 로봇의 안정성(stability)에 대한 연구에서 Sharon 등은 매크로/마이크로 로봇에서 상호 동적 영향은 매크로 로봇과 마이크로 로봇의 관성항의 차이가 클수록 적어짐을 보였고[8] 매크로/마이크로 로봇을 이용한 힘제어시 impedance matching 을 통해 제어 대역폭을 높일 수 있다고 하였다[9, 10].

접수일자 : 1999 5 18, 수정완료 : 1999 11, 12.
권동수, 황정훈 한국과학기술원 기계공학과
※본 연구는 보건복지부 보건의료기술 연구개발 사업(HMP-96-E-5-1015)과 인간 친화 복지 로봇 시스템 연구센터의 지원에 의해 이루어진 연구결과입니다

그러나 선행 연구들에서의 매크로/마이크로 로봇에 대한 공동작업 방법을 살펴보면 먼저 제어기가 하나인 시스템에 대해 Khatib는 일반적인 여유자유도 메니퓰레이터 제어방법을 사용하였고[1], Sharon등은 매크로 로봇과 마이크로 로봇에 대해 impedance 제어방법을 사용하였으나[6,8] 이러한 방법들은 단일 제어기 시스템에만 적합하다. 또한 Yoshikawa등은 유연성이 있는 매크로 로봇에 대해 사전에 정의된 궤적을 추종하도록 하고, 마이크로 로봇은 입력과의 오차를 보상하는 방법을 연구하였는데[12], 이는 사전에 위치명령을 알아야 하는 단점이 있고, Lew는 유연한 매크로/마이크로 로봇에서 마이크로 로봇이 움직일 땐 항상 매크로 로봇이 정지해 있도록 하고, 마이크로 로봇이 움직이지 않을 때 매크로 로봇을 천천히 움직여 주는 방법을 선택하였는데[5], 이는 마이크로 로봇의 작업범위를 정적으로 증가 시키는 것이라 할 수 있다. 또한 Reboulet등은 마이크로 로봇의 중립위치를 유지하는 방법을 이용하여 매크로 로봇을 제어하고 마이크로 로봇은 명령을 추종하도록 하였다[7] 그러나 선행연구에서 제어기가 분리• 고정된 시스템에 대해서 적합한 공동작업(coordination)방법이 무엇인가에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 미세수술 등의 작업을 위해 개발된 병렬 마이크로 로봇의 작업범위 증대를 위해 일반 산업용 직렬 로봇의 말단에 병렬 마이크로 로봇의 하관을 연결한 형태의 매크로/마이크로 로봇을 제안 하고, 이러한 시스템은 따로 설계된 두 로봇을 연결 하는 형태이기 때문에 각각의 제어기를 통합하지 않고 도 두 로봇이 공동작업 할 수 있는 방법을 연구했다. 매크로 로봇에 적합한 동작에 대한 연구 및 제어기가 분리된 매크로/마이크로 로봇에 대해 마이크로 로봇의 성능을 유지하며 매크로 로봇이 가질 수 있는 작업 공간을 갖도록 공동작업 (coordination) 방법을 제안하고, 실험을 통해 성능을 고찰한다.

II. 매크로/마이크로 로봇 시스템

1 매크로/마이크로 로봇의 동적특성

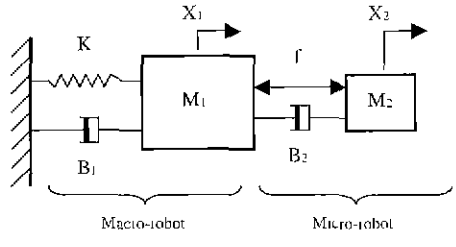
대부분의 매크로/마이크로 로봇은 두 개의 로봇을 직렬 연결한 형태이기 때문에 서로 동적 영향을 주게 된다. 먼저 마이크로 로봇이 매크로 로봇으로부터 받는 영향에 대해 Sharon은 매크로/마이크로 로봇에서 매크로 로봇의 동역학적 특성(dynamics)이 말단장치의 제어에 미치는 영향은 마이크로 로봇과 매크로 로봇의 관성비가 클수록 작음을 밝혔다[8]. 즉 그림 1 (a) 의 1 축 로봇의 매크로/마이크로 로봇에서 마이크로 로봇의 구동기의 힘과 마이크로 로봇의 말단장치의 위치간의 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{X_2}{f}=\frac{M_1S^2+B_1S+K}{S[M_1M_2S^3+(B_1M_2+B_2[M_1+M_2])S^2+(B_1B_2+KM_2)S+KB_2]} \quad (1)$$

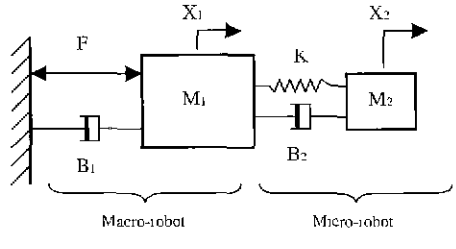
(1)의 전달함수에서 M1 >> M2 이라면 M1+M2≈M1, 따라서 위의 식은 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{X_2}{f}=\frac{1}{M_2S^2+B_2S} \quad (2)$$

즉 매크로 로봇의 동적 영향이 없어지게 된다. 또한 매크로 로봇이 마이크로 로봇의 거동에 의해 받는 영향은 각각의 로봇의 대역폭이 크게 다르기 때문에 거의 영향을 받지 않을 것이며 이는 그림 1(b) 의 시스템에서



(a)



(b)

그림 1. 마이크로 로봇과 매크로 로봇의 동적 영향. (a) 매크로 로봇의 동적영향, (b) 마이크로 로봇의 동적영향.

Fig. 1. Dynamic effect of the macro and the micro robot. (a) the effect of the macro robot dynamics, (b) the effect of the micro robot dynamics.

매크로 로봇의 힘과 매크로 로봇 말단과의 전달함수를 보면 알 수 있다

$$\frac{X_1}{F}=\frac{M_2S^2+B_2S+K}{S[M_1M_2S^3+(B_1M_2+B_2[M_1+M_2])S^2+(B_1B_2+K[M_1+M_2])S+KB_1]} \quad (3)$$

(3)은 M1>>M2 이면 역시 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{X_1}{F}=\frac{1}{M_1S^2+B_1S} \quad (4)$$

위의 두 전달함수의 분석으로부터 매크로/마이크로 로봇에서 매크로 로봇과 마이크로 로봇의 관성의 비가 크면 각각의 로봇은 서로 영향을 미치지 않음을 알 수 있고 매크로/마이크로 로봇의 안정성은 각 로봇의 안정성에 의해 결정된다고 할 수 있다.

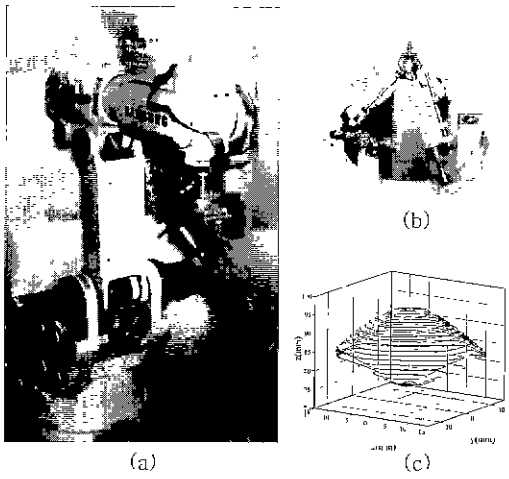
그러므로 제어기가 분리되어 있는 매크로/마이크로 로봇에 대해 각각의 제어기를 설계할 때, 각 로봇의 관성의 비가 크다면 독립적인 설계가 가능하다 이는 산업용 로봇을 제어기의 하드웨어적 수정 없이 매크로 로봇으로 쓸 수 있음을 의미한다.

2 매크로/마이크로 로봇의 관성항

Khatib는 매크로/마이크로 로봇의 작업공간에서의 관성(operational space inertia)은 마이크로 로봇의 작업공간에서의 관성과 같거나 작은 값을 갖으며 직선관절을 이용한 경우는 같은 값을 갖는다는 것을 증명하였다[1]. 이것으로부터 매크로/마이크로 로봇을 이용하여 마이크로 로봇만 이용하여 작업할 때와 같은 정도의 성능을 얻을 수 있고, 마이크로 로봇의 관성항이 작을수록 매크로/마이크로 로봇의 성능이 향상될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 마이크로 로봇의 관성항이 작다는 것은 크기도 작다는 것을 의미하게 되며 너무 작은 작업범위를 갖게 된다면 매크로 로봇의 위치오차를 보상하지 못하게 될 것이다. 이러한 분석으로부터 매크로/마이크로 로봇의 성능향상을 위해서는 매크로 로봇의 위치추종오차 이상의 작업범위를 가지면서 가능하면 가벼운 로봇을 마이크로 로봇으로 이용해야 하고, 최종적으로 원하는 성능의 매크로/마이크로 로봇을 만들기 위해서는 마이크로 로봇의 설계만이 아니라 마이크로 로봇의 작업범위를 고려한 매크로 로봇의 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다.

III. 시스템

미세수술을 위해 설계된 마이크로 로봇[13, 14]의 작업범위를 확장하기 위해 그림 2(a)와 같은 매크로/마이크로 로봇 시스템을 제시한다. 마이크로 로봇은 위치 3 자유도를 가지며 그림 2(b)와 같은 구조의 3개의 직선관절을 갖는 병렬 로봇으로 위치정밀도는 1μm이상이다. 마이크로 로봇의 작업공간은 주판알 모양의 형상에 25mm×25mm×15mm 정도의 크기(그림 2(c) 참조)를 갖는다. 마이크로 로봇의 제어대역폭은 4Hz이며 그림 3에 마이크로 로봇의 페루프 보드선도를 수록하였다. 매



(a) (b) (c)

그림 2. 제시된 매크로/마이크로 로봇. (a) 매크로/마이크로 로봇, (b) 마이크로 로봇, (c) 마이크로 로봇의 작업공간의 경계.

Fig. 2. The presented macro/micro robot, (a) the macro/micro robot, (b) micro robot, (c) the boundary of the workspace of the micro robot.

크로/마이크로 로봇시스템의 전체 성능은 마이크로 로봇의 성능에 의해 결정되므로 마이크로 로봇의 폐루프 성능은 매우 중요하다 수직 다관절 구조의 매크로 로봇[15]에는 구조적 특성으로 인해 발생하는 진동을 억제하기 위해 입력부에 저역 통과 필터(0.7 Hz Cutoff)를 설정하였다. 표 1에는 마이크로 로봇과 매크로 로봇에 대해 같은 크기의 궤적을 추종하는 실험결과를 수록하였다. 매크로 로봇의 궤적추종오차는 마이크로 로봇의 것에 비해 4배정도 크며 실험 대역폭 내에서는 마이크로 로봇의 작업범위 안에 충분히 들어감을 알 수 있다.

표 1. 궤적추종오차(RMS, 단위 : m).

Table 1. The tracking error (RMS, unit : m).

	0.5 Hz	1.0 Hz	1.5 Hz	2.0 Hz
마이크로 로봇	0.000323	0.000614	0.000883	0.00119
매크로 로봇	0.00125	0.00232	0.00314	0.00373

IV. 공동작업(coordination)

매크로/마이크로 로봇시스템은 일반적으로 한가지의 명령을 가지고 두개의 로봇의 특성을 잘 살릴 수 있도록 구동하는 적절한 방법이 필요하다. 단순히 매크로 로봇의 위치오차를 보정하는 수준이 아닌 마이크로 로봇의 장점을 살려 작은 작업공간에서도 여러 자유도를 요구하는 동작을 취할 수 있게 하는 것이다.

제안된 시스템은 각각의 로봇이 독립적인 제어기를 갖기 때문에 이러한 동작을 가능하게 하기 위해 먼저 주동자-추종자 기법[4, 11]을 이용하여 작업을 분리하고, 분리된 작업에 따라 각 로봇의 목표위치를 계산하여 각각의 로봇에 전달하기 위해 공동작업기를 설계하였다. 또한 분리된 작업중 매크로 로봇의 작업에 대해 효과적

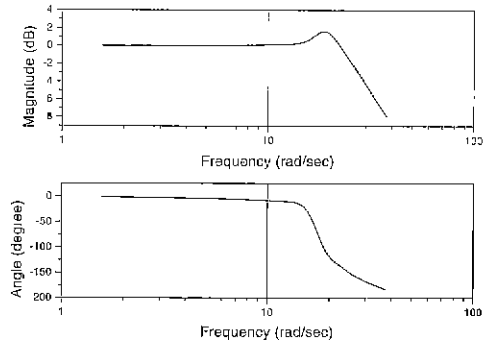


그림 3. 마이크로 로봇의 폐루프 보드선도.

Fig 3. The closed loop bode plot of the micro robot.

인 방법을 찾기 위해 매크로 로봇이 항상 움직여 마이크로 로봇의 중립위치를 유지하는 방법과 마이크로 로봇이 작업공간의 경계에 닿지 않도록 매크로 로봇을 가끔 움직이는 방법을 비교연구 하였다.

1. 작업의 분리 : 주동자-추종자 기법 도입

멀티암 또는 협동작업로봇들, 인공위성과 로봇팔등 하나의 작업에 여유자유도의 구동이 가능한 시스템은 각각을 제어하기 위해 적합한 공동작업 방법을 요구하게 된다 이러한 시스템의 경우 각 로봇 단위의 제어기는 서로 분리되어 있기 때문에 각 로봇을 효과적으로 제어하여 전체 로봇 시스템이 원하는 성능을 갖도록 하기 위해 한 로봇이 작업을 이끌어 나가고 나머지 로봇들은 그 것을 따라가게 제어하는 주동자-추종자 기법 또는 마스터-슬레이브 기법을 사용하기도 한다 이러한 제어방법은 각각의 로봇이 작업을 수행함에 있어서 작업내용의 충돌이 없이 이루어 지게 한다.

매크로/마이크로 로봇도 하나의 작업에 대해 넓은 작업범위를 확보하려 두개의 로봇을 이용하기 때문에 위에서 설명한 주동자-추종자 기법을 적용하여 작업을 효과적으로 분리할 수 있다. 외부로부터의 기준입력 (desired position or force)을 직접 수행할 마이크로 로봇을 주동자로 하고, 마이크로 로봇의 작업범위를 확장하기 위한 매크로 로봇을 추종자로 정의하면 쉽게 공동작업을 할 수 있다. 마이크로 로봇은 외부기준입력을 따라 거동하게 되며, 위치제어만 가능한 매크로 로봇은 마이크로 로봇이 작업범위를 벗어나지 않도록 하면 된다. 이러한 방법으로 공동작업할 경우 PID위치제어기가 장착되어 있는 산업용 로봇을 추가적인 비용과 노력 없이 매크로 로봇으로 이용할 수 있다.

그러나 매크로/마이크로 로봇을 이용한다고 해서 항상 마이크로 로봇의 작업범위를 매크로 로봇의 그것과 같게 할 수 있는 것은 아니며, 외부기준입력이 마이크로 로봇의 작업범위를 벗어나며 매크로 로봇이 마이크로 로봇의 작업범위에 해당하는 오차이내로 추종할 수 없을 만큼 빠르게 변화할 때는 매크로 로봇이 마이크로 로봇을 작업범위 안에 있도록 하는 작업이 실패하여 로봇의 거동이 발산 할 수 도 있기 때문에, 매크로/마이크로 로봇을 공동작업할 때 제한 점은 외부기준입력의 전체적 변화량이 매크로 로봇에 의해 추종 가능해야 한다

는 것이다.

2. 공동작업 제어기(coordinated controller)

앞의 작업분리방법에 의해 분리된 작업을 각각의 로봇에 지시하기 위해 공동작업 제어기는 명령입력값 및 각 로봇의 현재 상태를 이용하여 각 로봇의 다음 위치를 명령하게 된다.(그림 4 참조) 공동작업 제어기에서 수행되는 작업중 마이크로 로봇에 대한 입력계산 및 마이크로 로봇을 중립위치로 보내기 위한 매크로 로봇의 기준위치계산은 다음과 같다.

마이크로 로봇에 대한 입력을 계산하기 위해서는 명령입력값에서 매크로 로봇의 현재 말단위치를 뺀 것의 역기구학을 계산해야 한다. 그런데 이 과정에서 직교좌표상의 위치 및 방향의 6자유도 벡터를 이용하는 것은 계산상에 있어서 불리한 점이 많다. 위치 정보를 계산하는 과정을 보면 매크로/마이크로 로봇 말단에 대한 입력위치(직교좌표)에서 매크로 로봇의 현재위치(직교좌표)를 뺀 후 다시 이를 마이크로 로봇의 하판에 대한 직교좌표로 좌표변환 해주어야 하며 방향 정보를 계산시 단순한 각도의 가감이 아닌 회전행렬의 곱을 이용해 계산해야 한다. 따라서 본 연구에서는 입력위치벡터를 제외하고는 6자유도의 위치벡터를 이용하지 않고, 동차 변환 행렬을 이용하였다. 동차 변환 행렬을 이용할 경우의 장점은 각 로봇의 순기구학해의 계산시 ZYZ euler angle 이나 또는 RPY angle을 계산할 필요가 없고, 역기구학의 계산시 위치벡터로부터 동차 변환 행렬을 다시 구성할 필요가 없다. 대신 프로그램에서 역행렬을 계산해야 한다. 그림 5는 동차 변환 행렬을 이용한 공동작업 제어기의 구조이다. 각각의 동차 변환 행렬에 대해 설명하면, ${}^{0}T_{12desired}$ 는 매크로/마이크로 로봇에 대한 명령입력값을 동차 변환 행렬로 표시한 것이고, ${}^{0}T_{6real}$ 과 ${}^{6}T_{12real}$ 은 각각 매크로 로봇과 마이크로 로봇의 현재위치를 나타내는 동차 변환 행렬이며 이 두 동차 변환 행렬을 곱하여 구한 것이 ${}^{0}T_{12real}$ 이다. 마이크로 로봇에 대한 조인트명령을 계산하기 위해 ${}^{6}T_{12desired}=({}^{0}T_{6real})^{-1}\cdot{}^{0}T_{12desired}$ 의 계산을 하여 구한 동차 변환 행렬 ${}^{6}T_{12desired}$ 를 이용하여 역기구학을 푼다. 매크로 로봇에 대해서는 마이크로 로봇을 중립위치로 보내기 위한 매크로 로봇의 기준 조인트 위치를 계산하는데, 상수의 마이크로 로봇 중립위치 동차행렬인 ${}^{6}T_{12neutral}$ 이 필요하며 ${}^{0}T_{6desired}={}^{0}T_{12real}\cdot({}^{6}T_{12neutral})^{-1}$에서 구한 ${}^{0}T_{6desired}$ 를 이용한다.

매크로 로봇에 대한 입력명령는 마이크로 로봇이 중

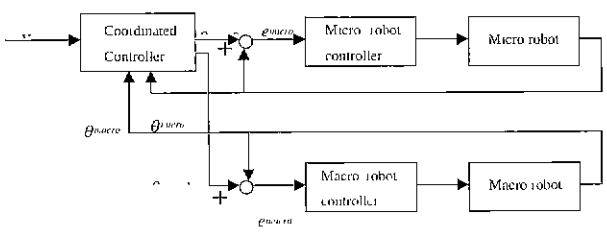


그림 4. 매크로/마이크로 로봇 제어 블록 선도.

Fig. 4. The block diagram of the macro/micro robot.

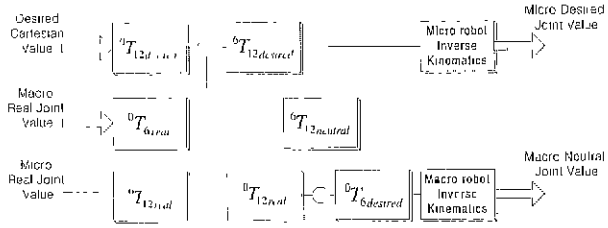


그림 5 동차 변환행렬을 이용한 공동작업 제어기의 구조.

Fig. 5. The structure of the coordinated controller using a homogeneous transform matrix.

립위치에 있도록 계속 매크로 로봇이 움직이는 경우(마이크로 로봇의 중립위치 유지방법)와 작업공간 경계에 이르지 않게끔 매크로 로봇이 간헐적으로 움직이는 경우(마이크로 로봇의 중립위치 추종방법), 각각에 따라 다르다. 먼저 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법을 설명하면 다음과 같다

2.1 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법

매크로/마이크로 로봇에 대한 기존의 연구를 보면 마이크로 로봇의 크기가 작아 작업가능범위를 벗어나는 상황이 발생하지 않도록 하기 위해 Khatib 나 Reboulet 등은 기준입력을 추종할 때 직접 사용되지 않는 구동력을 마이크로 로봇의 조인트가 중립위치로 유지되도록 하는데 사용하였다. 즉 매크로 로봇은 항상 마이크로 로봇이 중립위치에 근접할 수 있도록 제어된다. 매크로 로봇에 대한 입력은 앞의 동차 행렬에서 구한 마이크로 로봇을 중립위치로 보내기 위한 매크로 로봇의 기준위치가 된다.

그러나 이 방법은 마이크로 로봇 조인트를 항상 중립위치로 보내기 위해 외부기준입력이 마이크로 로봇의 작업범위에 비해 작은 범위에서 지속될 때에도 매크로 로봇의 불필요한 움직임을 만들 수 있으며, 이러한 불필요한 움직임은 실제 로봇시스템에서는 로봇의 탄성에 의한 진동등의 현상을 유발시킬 수도 있다.

2.2 마이크로 로봇의 중립위치 추종방법

앞의 중립위치 유지방법은 매크로 로봇을 항상 움직여야만 하는 방법이라면 마이크로 로봇의 중립위치 추종방법은 마이크로 로봇이 작업공간의 경계에 닿는 것을 막기 위해 정해진 작업범위를 벗어나려 할 때만 매크로 로봇을 움직이는 방법이다. 그림 6에 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법 및 중립위치 추종방법의 차이를 쉽게 알 수 있도록 그림으로 나타내었다.

즉 마이크로 로봇의 중립위치 추종방법은 마이크로 로봇에 대해 마이크로 로봇의 작업공간보다 작은 작업범위(이하 허용작업범위라 함)를 정의하고, 매크로 로봇은 외부 기준입력에 따라 움직이는 마이크로 로봇이 허용작업범위를 벗어나려 할 때만 마이크로 로봇 조인트가 중립위치에 근접하도록 움직이게 된다. 허용작업범위라는 것을 둔 것은 움직이고 있는 마이크로 로봇에 대해 매크로 로봇이 마이크로 로봇을 중립위치로 보내기

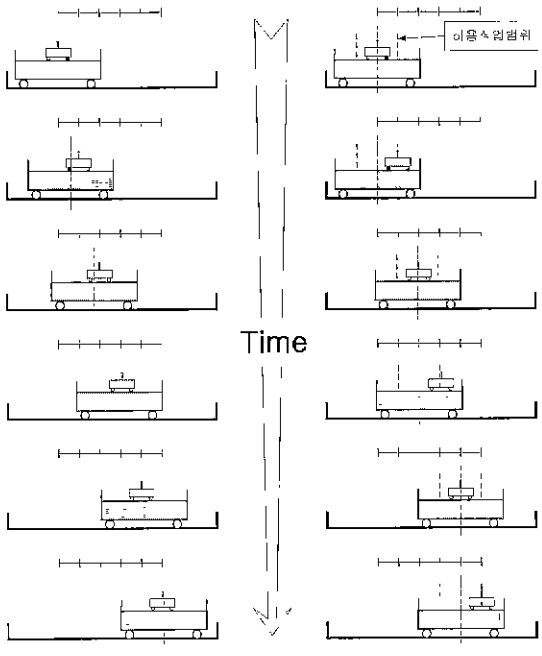
위해서는, 중립위치로 옮기는 사이에 마이크로 로봇이 작업공간의 경계에 닿지 않도록 하기 위함이다. 이때 매크로 로봇이 잘 추종할 수 있는 적당한 궤적을 만들어 주어야 하는데 마이크로 로봇은 계속 움직이고 있기 때문에 궤적을 만들 때의 매크로 로봇 말단의 현재위치와 목표위치를 이용한 기존의 시간기반궤적을 이용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 새로운 방법, 즉 목표위치가 변화하는 상황에서 C^2연속인 궤적을 만드는 것이 필요하다.

2 3 궤적생성기

본 연구에서는 움직이는 목표위치에 근접할 수 있는 궤적생성을 위해 다음과 같은 궤적생성방법을 제안한다. 먼저 직교 좌표계에서 보면 그림 7과 같이 목표지점이 어떤 궤적을 따라 움직이는 경우 매크로 로봇 말단을 P_1, 마이크로 로봇 조인트를 중립위치로 보내기 위한 매크로 로봇 목표지점을 P_2 라 하면 (5)와 같이 $P_1 \Rightarrow P_2$ 로의 방향벡터 $\bar{S}$를 정의할 수 있다.

$$\bar{S} = \bar{P}_2 - \bar{P}_1 \tag{5}$$

그리고 두 점은 로봇의 거동에 따라 정의 되기 때문에 방향벡터 $\bar{S}$는 시간에 대해 부드럽게 변화할 것이다. 따라서 이 방향에 대해 마이크로 로봇이 허용작업범위로부터 벗어나는 순간(t_1)과 중립위치에 대해 남은 거리가 속도감속궤적의 넓이와 같아질 순간(t_2)의 두 이벤트



(a) 중립위치 유지 (b) 중립위치 추종

그림 6. 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법과 추종방법의 비교.

Fig. 6. The comparison of always maintaining the micro robot at the neutral position and Maintaining the micro robot within its workspace.

(event)에 의해 C^2연속하도록 가감하는 속도 스칼라량 Vs를 정의하고 매크로 로봇 말단에 대해 (6)과 같은 궤적을 만들어 준다.

$$\bar{V} = Vs\ \bar{S}$$
$$\bar{P} = \int \bar{V}\, dt \tag{6}$$

이러한 궤적이 C^2연속하기 위해서는 Vs와 $\bar{S}$가 연속으로 변하고, 그의 미분이 각각 연속으로 변하면 된다 ((7) 참조). 그런데 Vs는 C^2연속하도록 정의 하였으므로 그것의 미분도 연속이다. 따라서 $\bar{S}$ 와 그의 미분이 연속적으로 변하면 (6)으로 정의된 궤적은 C^2연속이다.

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{dVs}{dt}\cdot\bar{S} + Vs\cdot\frac{d\bar{S}}{dt} \tag{7}$$

먼저 $\bar{S}$ 의 연속성을 보려면, P_1과 P_2의 연속성을 보면 된다. 먼저 P_1을 보면 P_1은 위에서 정의한 속도벡터를 시간에 대해 적분한 경로를 추종하게 되므로 연속이게 된다. P_2는 마이크로 로봇의 말단에서 상수벡터(마이크로 로봇이 중립일 때 마이크로 로봇의 말단과 매크로 로봇의 말단과의 거리차)를 뺀 것이므로 마이크로 로봇의 말단의 연속성에 지배 받는다 따라서 마이크로 로봇의 말단의 위치가 연속적으로 변하는 궤적을 추종하게 되면 P_2는 연속적으로 변화함을 알 수 있다. 따라서 $\bar{S}$는 연속적으로 변화함을 알 수 있다. 또한 위에서 제안한 속도벡터는 연속적으로 변화한다. $\bar{S}$ 의 미분을 취한 것의 연속성은 역시 P_1과 P_2의 속도의 연속성을 보면 된다 속도벡터의 연속성을 증명하였으므로 P_1의 궤적은 최소한 속도까지 연속인 것을 알 수 있다. 따라서 P_1의 속도는 연속적으로 변화한다. P_2의 경우는 마이크로 로봇의 말단이 속도까지 연속적으로 변하는 궤적을 추종하면 된다. 그런데 일반적으로 로봇의 궤적을 생성할 때 또는 마스터-슬레이브 시스템에서 슬레이브 로봇에 대한 위치명령은 속도까지 연속으로 변화하므로 이와 같은 요건은 쉽게 충족된다. P_2 의 궤적이 속도까지 연속일 경우 $\bar{S}$ 의 미분까지 연속으로 변화하며, 따라서 속도벡터 $\bar{V}$는 그것의 미분까지 연속적으로 변화한다

결론적으로 제안된 방법으로 생성된 궤적은 마이크로 로봇의 말단이 속도까지 연속인 궤적을 추종할 경우 C^2

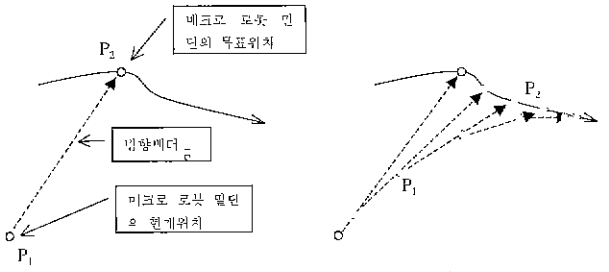


그림 7 방향벡터 및 매크로 로봇의 예상 경로

Fig. 7. The direction vector and the expected trajectory of the macro robot.

연속하다. 제안된 방법은 다음과 같은 특징을 지닌다 첫째, 작업공간이나 조인트 공간 좌표계에 모두 적용가능하다. 둘째, 조인트 좌표계에 적용할 경우 조인트의 허용속도를 고려한 궤적 생성이 가능하기 때문에 실제 로봇에 적용하기가 용이하다. 마지막으로 목표지점이 움직이는 경우 한번의 궤적생성으로 목표지점에 근접할 수 있다는 장점이 있고, 정지되어 있는 목표에 대해서는 정확한 접근이 가능하다.

제시된 로봇 시스템에 위의 궤적생성방법을 적용하기 위해 공동작업 제어기에 그림 8과 같은 구조의 궤적생성기를 추가 하였다. 궤적생성기의 입력으로는 조인트 공간의 목표위치와 마이크로 로봇의 조인트 변수이며 마이크로 로봇의 조인트변수로부터 마이크로 로봇의 허용작업범위 이탈여부를 계산하고, 이탈시 목표 조인트 변수와 현재 조인트 변수의 차를 정규화하여 방향벡터를 구하고, 마이크로 로봇이 허용작업범위를 벗어날 때부터 중립위치에 접근할 때까지의 속도궤적을 정의하여 곱하면 각 조인트에 대해 목표위치로 동시에 시작하고 멈추는 궤적을 생성한다.

V. 실험

1 실험장치

실험장치는 그림 9와 같다. 실험은 마이크로 로봇 말단의 위치 3자유도의 제어를 위해 앞에서 설계된 공동작업제어기와 궤적생성기를 수정하지 않고, 단지 공동작업제어기에 사용되는 마이크로 로봇의 순기구학 및 역기구학 함수내부의 직교좌표계상의 동차 변환행렬에서 방향이 모두 하판의 X, Y, Z 축과 일치하는 방향으로 하여 공동작업제어기는 6자유도 위치제어(position & orientation)시의 것을 그대로 사용하였다. 공동작업제어기로의 입력에서는 3개의 위치명령만 변화하고 3개의 방향에 대해서는 초기치를 유지하도록 하였다. 매크로/마이크로 로봇 시스템에 대한 입력 명령은 X,Y 방향으로 원호궤적을 추종하며 Z 방향 유지작업으로 0.5 Hz에서 2.0 Hz까지의 다양한 대역폭으로 실험을 수행하였다. 실험데이터는 200 Hz로 수집하였다.

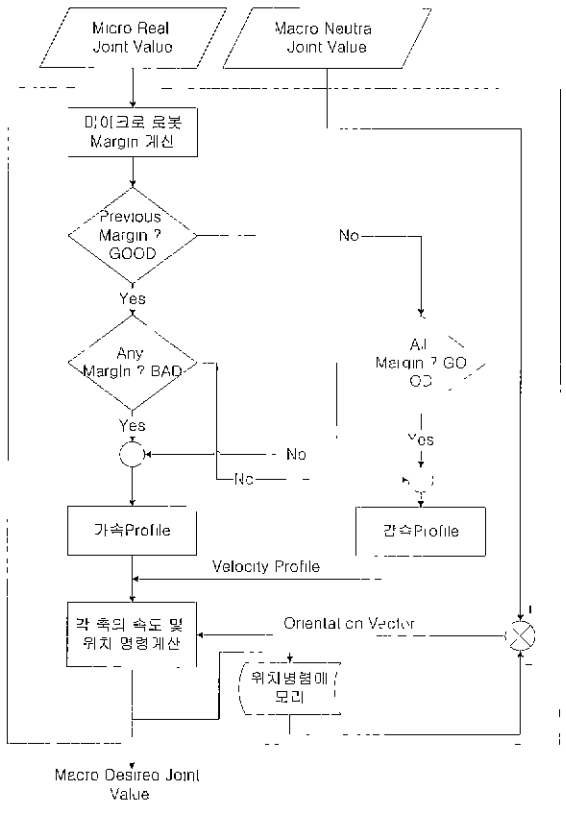


그림 8. 궤적생성기.
Fig. 8. The trajectory generator.

2. 실험결과 및 분석

표 2 는 실험에서 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법 및 중립위치 추종방법의 궤적추종오차의 RMS 값을 궤적의 대역폭에 따라 비교한 것이다.

표 2. 궤적추종오차(RMS, 단위 : m).
Table 2. The tracking error(RMS, unit : m).

	0.5 Hz	0.75 Hz	1.25 Hz	1.5 Hz	2.0 Hz
중립위치 유지방법	0.000285	0.000489	0.000941	0.001222	0.001672
중립위치 추종방법	0.000399	0.000577	0.000943	0.001138	0.001534

매크로/마이크로 로봇에 대해 매크로 로봇의 대역폭보다 낮은 대역의 입력을 가하면 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법의 성능이 마이크로 로봇의 중립위치 추종방법보다 좋지만, 매크로/마이크로 로봇에 대해 매크로 로봇의 대역폭보다 대역폭이 높은 입력을 가할 경우 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법의 성능의 감소 폭이 컸다. 즉 매크로 로봇의 대역폭보다 낮은 입력은 매크로 로봇의 위상지연이 크지 않기 때문에 전체적으로 오차를 줄여주는 방향의 거동을 하게 되나, 매크로 로봇의 대역폭보다 높은 입력에는 매크로 로봇의 위상지연이 크게 발생하여 오차의 크기가 심하게 변동하는 것을 그림 10에서 볼 수 있다 그에 비해 마이크로 로봇의 중

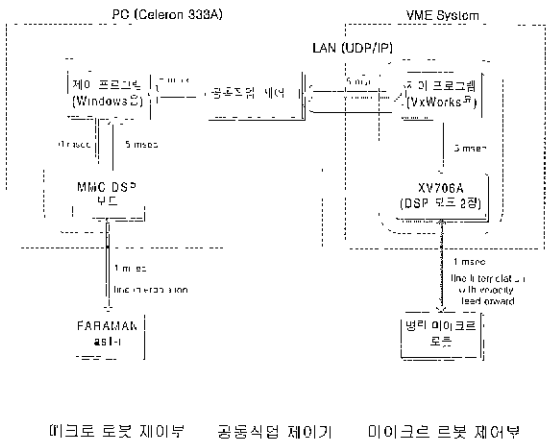


그림 9. 실험 장치 Diagram.
Fig. 9. The diagram of the experimental equipments

립위치 추종방법에서 매크로 로봇의 거동은 입력의 대역폭과는 직접적인 관계가 없기 때문에, 매크로 로봇의 거동이 전체시스템에 주는 영향의 변화가 적어 오차의 크기가 일정하다

이는 같은 대역폭의 궤적을 마이크로 로봇만을 사용하여 추종하게 하였을 때의 추종오차의 RMS 값과 매크로/마이크로 로봇의 추종오차의 RMS 값을 비교한 그래프(그림 11)를 보면 좀더 확실하여 마이크로 로봇의 중립위치 추종방법은 마이크로 로봇만 가지고 하였을 경우와 같은 비율의 추종오차 대 대역폭의 관계를 가지나 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법은 낮은 대역폭에서는 마이크로 로봇만 사용한 경우보다 추종오차가 작지만 높은 대역폭으로 갈수록 그 오차가 많이 커짐을 알 수 있다. 따라서 매크로/마이크로 로봇에 대해 본 실험에서와 같이 마이크로 로봇과 매크로 로봇의 대역폭의 차이가 크지 않은 경우에는 매크로/마이크로 로봇의 주작업대역에 따라 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법과 중립위치 추종방법의 선택적 사용이 필요할 것이다.

중립위치 추종방법에서 이용한 궤적생성방법의 유효성을 보기 위해 실험 중에 생성된 궤적을 그림 12에 수록하였다. 그림에서 위치명령의 수치미분치의 기울기가 급격히 변하는 지점이 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 제안된 궤적생성방법은 C^2연속한 궤적생성이 가능하다.

VI. 결론

본 연구에서는 병렬 마이크로 로봇의 작업공간을 확장하기 위해 산업용 로봇의 말단에 마이크로 로봇을 직렬 연결한 형태의 매크로/마이크로 로봇을 제시하고 제어알고리즘을 제안하였다.

매크로/마이크로 로봇 시스템에 대한 동역학적 특성 및 성능의 분석을 통해 제어기가 분리된 시스템에 대하여 독립적 제어기 설계가 가능함을 제시하였고, 각각의 로봇이 독립된 제어기를 갖는 매크로/마이크로 로봇의 적합한 공동작업방법으로 주동자-추종자 기법을 이용한 작업분리와 매크로 로봇의 작업 구현방법을 연구하여, 매크로 로봇의 동작방법으로 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법 및 제안한 중립위치 추종방법에 비교 실험을 수행하였고, 실험결과로부터 중립위치 추종방법이 마이크로 로봇만 움직일 때와 비슷한 성능을 나타내며 비교적 높은 대역에서 마이크로 로봇의 중립위치 유지방법보다 성능저하가 작음을 알았다. 또한 매크로 로봇에 대한 궤적생성에서 조인트 공간상에서 일정한 속도 한계를 가지면서 움직이는 목표위치에 대해 근접 추종할 수 있는 C^2연속한 궤적생성법을 제안하였고 실험을 통해 이를 확인하였다.

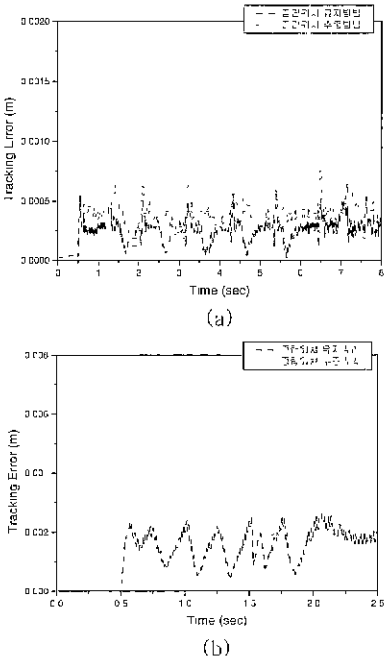


그림 10. 실험결과 – 궤적추종오차. (a) 0.5Hz 대역의 궤적, (b) 2.0Hz 대역의 궤적.

Fig. 10. The experimental results – the tracking error. (a) The trajectory of 0.5Hz bandwidth, (b) The trajectory of 2.0Hz bandwidth.

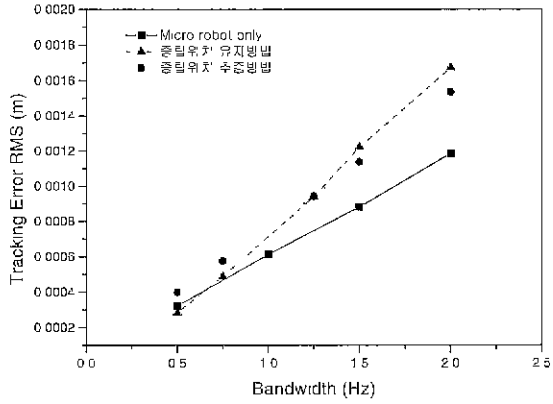


그림 11. 입력궤적 대역폭 대 추종오차 RMS 의 비교.

Fig. 11. The comparison of the tracking errors with the bandwidth of the input trajectory.

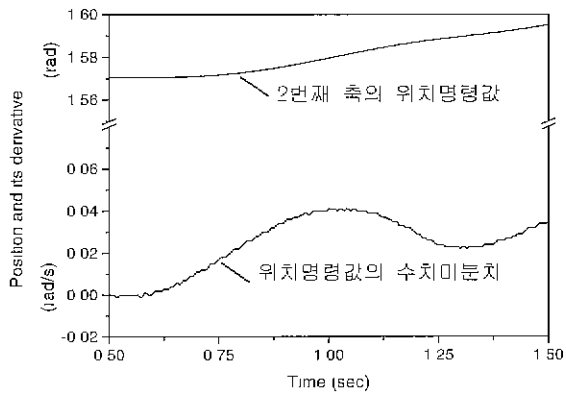


그림 12. 중립위치 추종방법 실험에서 생성된 궤적

Fig. 12. The trajectory which was generated in the experiment of the maintaining the micro robot within its workspace.

참고문헌

[1] Khatib, O., "Augmented object and reduced effective inertia in robot systems," *Proc. of the 1988 American Control Conference*, pp. 2140-2147, 1988.

[2] Khatib, O., "The operational space framework," *JSME International Journal*, pp. 227-287, 1993.

[3] Khatib, O. and Bowling, A., "Optimization of the inertial and acceleration characteristics of manipulators," *Proc. of the IEEE/R&A*, pp. 2883-2889, 1996.

[4] Kosuge, K., Seki, H. and Oosumi, T., "Calibration of coordinate system for decentralized coordinated motion control of multiple manipulators," *Proc. IEEE Conf. R&A*, pp. 3297-3302, 1998.

[5] Lew, J. Y., "Contact control of flexible micro/macro-manipulators," *Proc. Of the IEEE/R&A*, pp. 2850-2855, 1997.

[6] Nagai, K. and Yoshikawa, T., "Impedance control of redundant macro-micro manipulators," *Proc. of the IEEE/RSJ*, pp. 1438-1445, 1994.

[7] Reboulet, C. and Pigeyre, R., "Hybrid control of a 6-DOF in-parallel actuated micro-manipulator mounted on a scara robot," *International Journal of Robotics and Automation* vol. 7, no. 1, pp. 10-14, 1992.

[8] Sharon, A., Hogan, N., and Hardt, D. E., "The macro/micro manipulator: an improved architecture for robot control," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 10, no. 3, pp. 209-222, 1993.

[9] Sharon, A., Hogan, N., and Hardt, D. E., "High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulation system," *Proc. IEEE Conf. R&A*, pp. 126-132, 1988.

[10] Sharon, A., Hogan, N. and Hardt, D. E., "Controller design in the physical domain," *Proc. IEEE Conf. R&A*, pp. 552-559, 1989.

[11] Tarn, T. J., Bejczy, A. K. and Yun, X., "Coordinated control of two robot arms," *Proc. IEEE Int. Conf. R&A*, pp 1193-1202, 1986

[12] Yoshikawa, T., Hosoda, K., Harada, K., Matsumoto, A. and Murakami, H., "Hybrid position/force control of flexible manipulators by macro-micro manipulator system," *Proc. of the IEEE/R&A*, pp. 2125-2130, 1994.

[13] 송세경, "미세수술을 위한 6자유도 병렬 매니퓰레이터의 디자인," masters thesis, KAIST, 1997.

[14] 송세경, 권동수, "정밀작업용 6자유도 병렬 머니퓰레이터의 기구학 해석," 한국자동제어 학술회의, pp. 1787-1790, 1998.

[15] 삼성전자, "Faraman-AS1 모듈형 소형수직다관절 로봇-로봇본체 유지보수 설명서," 삼성전자, 1997.

황 정 훈

1997년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1999년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1999년~현재 한국과학기술원 박사과정 재학중. 관심분야는 Human-robot haptic interface, 로봇제어 등.

권 동 수

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1991년 Georgia Institute of Technology 기계공학과 박사. 1991년~1995년 Oak Ridge National Laboratory research staff. 1995년~현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수 관심분야는 원격 조정 로봇시스템, Human-robot haptic interface, 의료용 로봇, 강인제어 등.