

파워 어시스트 시스템을 위한 이동 머니플레이터의 제어

Control of Mobile Manipulators for Power Assist Systems

李 炯 機* · 成 永 輝** · 鄭 明 振***

(Hyoung-Ki Lee · Young Whee Sung · Myung Jin Chung)

Abstract - In this paper, we present a control method of mobile power assist systems. Most of mobile power assist systems have a heavy mobile base for preventing easy tumbling, so continual movement of the base during operations causes high energy consumption and gives the high risk of human injury. Furthermore, the slow dynamics of the base limits the frequency bandwidth of the whole system. Thus we propose a cooperation control method of the mobile base and manipulator, which removes the unnecessary movements of the base. In our scheme, the mobile base does not move until the center of gravity(C.G.) of the system goes outside a safety region. When C.G. reaches the boundary of the safety region, the base starts moving to recover the manipulator's initial configuration. By varying the parameters of a human impedance controller, the operator is warned by a force feedback that C.G. is on the marginal safety region. Our scheme is implemented by assigning a nonlinear mass-damper-spring impedance to the tip of the manipulator. The experimental results show the efficacy of the proposed control method.

Key Words : Mobile manipulator; power assist system; impedance controller

1. 서 론

파워 어시스트 시스템은 작업자의 힘을 보조하여 작업자가 용이하게 무거운 물체를 운반할 수 있도록 도와주는 시스템을 말한다. 이 시스템을 이용하여 작업자는 실제의 부하 무게보다 훨씬 적은 힘으로 무거운 물체를 다룰 수 있으며 이와 같은 시스템은 산업체나 재활의료 등의 분야에 넓게 이용될 수 있다. 파워 어시스트 시스템의 개념은 30년 전에 처음으로 제안되었다. 1960년대 파워 어시스트 시스템의 적용 가능성이 Cornell Aeronautical Laboratory [1]에서 확인되었고, General Electronic은 Hardiman이라는 시스템을 개발하였다 [2]. Kazerooni는 자재 운반 작업에서 사용하기 위하여, 작업자가 입는 형태의 익스텐더(extendor)라는 로봇 시스템을 개발하였다 [3,4,5]. Hayashibara 등은 부하힘(load force)의 중력항만을 먼저 보상하고, 서보 구동기(servo actuator)에 여분의 힘이 있으면, 부하힘의 나머지 항을 보상하는 파워 어시스트 시스템을 제안하였다 [6,7,8]. 이상에서 연구된 시스템들이 바닥면에 고정되어 있는 반면, 모바일 파워 어시스트시스템(mobile power assist system)은 모바일 베이스와 그 위에 장착된 파워 어시스트 시스템으로 구성되어 있다. 모바일 파워 어시스트 시스템은 머니플레이터의 덱스트러스(dextrous)

작업영역을 무한대로 확장할 수 있는 장점이 있으나, 전체 시스템의 자유도가 증가하여 여유 자유도 문제를 풀어야 하는 단점도 갖게 된다. 모바일 머니플레이터에 대한 기존의 연구를 살펴보면, 많은 연구자들이 모바일 베이스와 머니플레이터를 하나의 통합된 시스템으로 간주하고, 일반 여유자유도 시스템의 역기구학문제의 해를 적용하여 모바일 머니플레이터의 경로 궤적 문제를 푸는 방식을 제안하였다 [9,10,11]. 또, 작업 공간(operational space)에서의 모바일 작업의 관성 특성과 기구학적 일관성(kinematic consistency)등이 연구되었다 [12]. 그러나, 이상의 연구에서 시스템의 전복을 방지하는 문제는 간과되고 있다. 모바일 파워 어시스트 시스템은 보통 무거운 물체를 운반하고 있기 때문에 시스템의 전복을 방지하는 것이 가장 중요한 제어 목표가 되고 있다. Fukuda 등은 시스템의 전복을 방지하기 위하여 머니플레이터의 무게중심(C.G.)을 지지다각형(supporting polygon)내에 유지하기 위하여 제어를 수행되었다 [13]. 또 머니플레이터의 과도한 신장과 수축을 방지하기 위하여 조작성 척도(manipulability measure)가 높은 자세를 유지하기 위하여 제어가 수행되었다 [14]. 위의 연구에서 모바일 베이스는 팁 위치에 주어진 경로를 추종하기 위하여 항상 연속적으로 움직이고 있다. 그러나, 모바일 파워 어시스트 시스템은 쉽게 전복되지 않도록 무거운 베이스를 가지고 있기 때문에 베이스의 연속적인 움직임은 에너지를 많이 소모하고, 작업자를 심리적으로 불안하게 만들기도 한다. 게다가 베이스의 늦은 움직임은 전체 시스템의 동력학을 느리게 만드는 단점도 있다.

본 논문에서는 시스템의 전복을 방지하며 베이스의 불필요한 움직임을 제거하는 모바일 베이스와 머니플레이터의 협조 제어 방법을 제안한다. 이 제어 목적을 달성하기 위하여, 휴

* 正 會 員 : 三星綜合技術院 IP sector HCI Lab. · 工博

** 正 會 員 : 金鳥工科大 電子工學部 專任講師 · 工博

*** 正 會 員 : 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 17日

最終完了 : 2000年 1月 12日

면 임피던스 제어기로서 마찰력을 갖는 가상의 질량-댐퍼-스프링 임피던스를 채택한다. 이 임피던스를 이용하여 틱 움직임은 모바일 베이스의 움직임과 머니플레이터의 움직임으로 분해되어 여유자유도 문제를 해결할 수 있다. 또 안정성과 조작성 척도 등을 이용하여 작업 선호 영역(preferred operating region)을 설정하고 이 안에 머니플레이터의 틱을 위치시키기 위하여 제어를 수행한다. 모바일 베이스는 머니플레이터의 틱이 작업 선호 영역 내에 존재할 때는 정지되어 있고 틱이 작업 선호 영역의 경계를 이탈하면 베이스는 머니플레이터의 초기 자세를 회복하기 위하여 움직이기 시작한다. 또한 틱이 작업 선호 영역의 경계면의 근방에 위치할 때는 휴먼 임피던스 제어기의 스프링 성분의 힘에 의하여 작업자가 힘계환을 받아 작업 선호 영역을 공간적으로 인지할 수 있는 장점도 갖고 있다. 2장에서는 모바일 파워 어시스트 시스템의 개요 및 기구학 및 동력학적 해석을 살펴보고 3장에서는 가상의 비선형 임피던스를 도입하여 제어기를 설계한다. 4장에서는 실험 결과를 보이고 5장에서 결론을 제시한다.

2. 시스템 해석

그림 1은 모바일 파워 어시스트 시스템의 개념도이다. 모바일 파워어시스트 시스템은 모바일 베이스에 장착된 머니플레이터와 엔드-이펙터(end-effector), 제어 레버, 그리고 제어기로 구성되어 있다. 머니플레이터는 2개의 힘/토크 센서를 장착하고 있다. 하나는 조작용 힘 센서(operational force sensor)이고 또 하나는 부하힘 센서(load force sensor)이다. 조작용 힘 센서는 최종 링크와 제어 레버사이에 장착되어 있고, 부하 힘 센서는 엔드-이펙터와 최종 링크 사이에 장착되어 있다. 조작용 힘 센서로부터 전달되는 힘/토크 신호는 작업자 힘 F_h 로 정의되고, 부하힘 센서로부터의 신호는 부하힘 F_L 로 정의된다. 시스템이 부하를 운반하기 위하여 작업자는 제어 레버에 힘을 가하고, 머니플레이터는 작업자의 움직임을 추종하도록 제어되며, 부하힘 F_L 을 γ 만큼 감소시킨다. 여기서 γ 는 부하비(load ratio)로써 작업자의 힘과 부하힘과의 비로 정의된다. 부하힘을 γ 만큼 감소시키기 위해서는 틱 좌표계에서 $\gamma F_L - F_L$ 만큼의 힘/토크를 부하에 전달해야 한다.

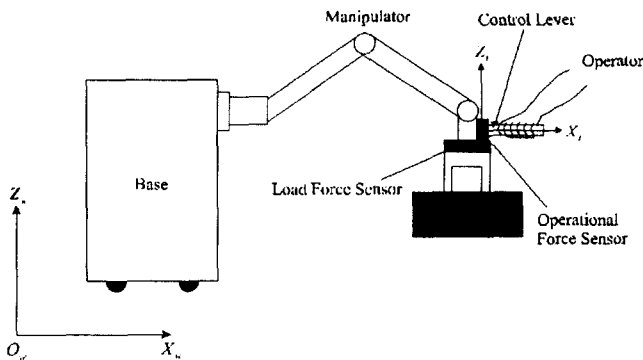


그림 1 모바일 파워 어시스트 시스템의 개념
Fig. 1 Concept of the mobile power assist system

본 논문에서 다루는 시스템은 7축의 머니플레이터와 3축의 베이스를 갖고 있어 일종의 여유 자유도 시스템으로 간주할 수 있다. 그림 2와 같이 월드 좌표, 베이스 좌표, 틱 좌표의 3개의 좌표계를 설정하자. 그림 2에서, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 는 고정된 월드 좌표계이고 $O_{ba} - X_{ba} Y_{ba} Z_{ba}$ 는 모바일 베이스의 중심에 고정된 베이스 좌표계이고 $O_t - X_t Y_t Z_t$ 는 머니플레이터의 엔드-이펙터에 고정된 틱 좌표계이다. 로봇의 틱의 속도(\dot{X})는 머니플레이터의 속도(\dot{X}_m)와 모바일 베이스의 속도(\dot{X}_b)의 합으로 표시될 수 있다. 또 머니플레이터의 관절 속도($\theta_m \in R^7$)와 머니플레이터의 속도(\dot{X}_m)는 머니플레이터의 자코비안($J_m = \frac{\partial X_m}{\partial \theta_m} \in R^{6 \times 7}$)을 이용하여 $\dot{X}_m = J_m \dot{\theta}_m$ 로 표현할 수 있다. 또 모바일 베이스의 속도(\dot{X}_b)는 X축방향, Y축방향, Z축회전이 독립적으로 제어가 가능하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X}_b = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \in R^6 \quad (1)$$

결국 로봇팔의 틱의 위치는 월드 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{X} = \dot{X}_m + \dot{X}_b = J_m \dot{\theta}_m + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \in R^6 \quad (2)$$

또 행렬을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} J_m & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

그러므로 전체 시스템의 자코비안($J = \frac{\partial X}{\partial \theta}$)은 다음과 같이 구해진다.

$$J = \begin{bmatrix} J_m & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in R^{6 \times 10} \quad (4)$$

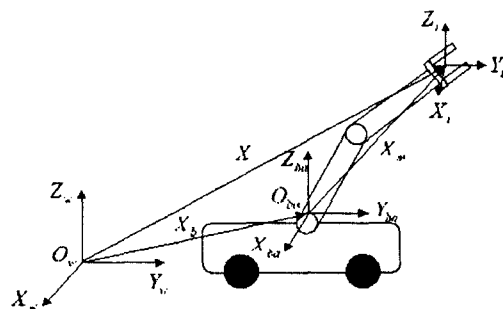


그림 2 전체 시스템의 좌표계 설정
Fig. 2 Coordinate system

한편 모바일 베이스와 로봇팔을 포함한 전체 시스템은 라그랑지 방정식에 의하여 관절 공간(joint space)에서 다음과 같은 동력학식을 갖는다.

$$A(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau \quad (5)$$

여기서 $A(\theta)$ 는 관성 행렬(inertia matrix), $c(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력과 코리올리 힘(centrifugal and Coriolis joint-forces), $g(\theta)$ 는 중력(gravity joint-force)을 각각 나타내고, $\theta \in R^{10}$ 는 관절 각도, $\tau \in R^{10}$ 는 관절 토크를 각각 나타낸다. 한편 작업자 힘 $F_h \in R^6$, 부하힘 $F_L \in R^6$, 그리고 제어 입력인 파워 어시스트 힘 $F_a \in R^6$ 등은 틱 좌표계에 대하여 표현하면 편리하므로 틱 좌표계에서의 동력학을 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$F_a + F_L + F_h = M_a(X)\ddot{X} + B_a(X)\dot{X} + f_a(X, \dot{X}) + M_{ag}(X) \quad (6)$$

여기서 관성 행렬 $M_a(X) \in R^{6 \times 6}$, 점성 마찰력 계수 행렬 $B_a(X) \in R^{6 \times 6}$, 중력 $M_{ag}(X)$ 과 원심력과 코리올리(Coriolis) 힘과 같은 다른 비선형항 $f_a(X, \dot{X}) \in R^6$ 들도 틱 좌표계에 대하여 표현되어 있다.

휴먼 임피던스 제어기(human impedance controller)는 작업자의 조작력과 머니플레이터의 틱의 속도사이의 임피던스를 정의하며, 머니플레이터의 틱의 움직임은 이 휴먼 임피던스 제어기에 의하여 결정되어지고, 작업자가 작업을 수행하는 동안에 작업자는 이 제어기로 결정되는 임피던스를 느끼게 된다. 기존의 연구에서 이 제어기는 다음과 같은 선형 질량-댐퍼 시스템으로 주어진다.

$$F_h + \gamma F_L = M_{id}\ddot{X} + B_d\dot{X} \quad (7)$$

여기서 M_{id} 와 B_d 는 원하는 질량 및 점성 마찰력 계수이다. 위의 식은 입력이 $F_h + \gamma F_L$ 이고 출력이 \dot{X} 인 임피던스 관계식으로 간주할 수 있고 작업자가 느끼는 임피던스 $\frac{\dot{X}}{F_h}$

는 $\frac{1}{M_{id}s + B_d}$ 가 된다. 파라미터 M_{id} 과 B_d 를 변경함으로써 작업자가 느끼는 임피던스를 조절할 수 있다. 위의 휴먼 임피던스 제어기를 구현하기 위한 파워 어시스트 힘은 (7)식을 (6)식에 대입하여 다음과 같이 구해진다.

$$F_a = -(I - \gamma)F_L + f_a(X, \dot{X}) + M_{ag}(X) + (M_a(X) - M_{id})\ddot{X} - B_d\dot{X} \quad (8)$$

위 힘을 관절 토크로 변환하여 구동기(actuator)를 구동하게 된다. 다음과 같은 여유자유도의 해를 이용하여 관절 토크 τ 를 구할 수 있다[16].

$$\tau = J^T(\theta)F_a + (I - J^T(\theta)J^{T*}(\theta))\Gamma_0 \quad (9)$$

여기서 J^{T*} 는 J^T 의 일반화 역행렬(generalized inverse)이다. Γ_0 는 임의의 관절 토크 벡터이고 $I - J^T(\theta)J^{T*}(\theta)$ 의 널 스페이스(null space)에 의하여 조인트 공간에 투영된다. 위의 식에서 사용자가 정의 가능한 설계 파라미터는 Γ_0 하나이기 때문에, 베이스의 움직임과 머니플레이터의 움직임을 사용자의 의도대로 독립적으로 제어하기 힘든 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 가상의 임피던스를 제한 조건으로 도입하여 여유자유도 문제를 풀고자 한다.

3. 가상 임피던스를 이용한 제어기 설계

본 논문에서는 전장의 전형적인 여유자유도해를 이용하지 않고 베이스와 머니플레이터에 직접 임피던스 제한 조건을 가함으로써 여유자유도 문제를 해결하고자 한다. 이 방법은 베이스의 운동과 머니플레이터의 운동을 사전에 개념적으로 쉽게 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이를 위하여 그림 3에 주어진 가상의 임피던스를 (7)식 대신에 휴먼 임피던스 제어기로 사용하여 머니플레이터의 틱에 부과한다. 설명을 간단히 하기 위하여, 시스템은 X 축 방향으로만 움직인다고 가정한다. 그림에서 X_b 과 X 는 월드 좌표계에서 표현된 베이스와 작업자의 틱의 위치이고 X_m 는 그들 사이의 상대적 거리이다. X_b 과 X_m 에 의한 이 시스템의 동력학 식은 다음과 같이 주어진다.

$$F_h + \gamma F_L = M_{id}(\ddot{X}_m + \ddot{X}_b) + B_d\dot{X}_m + K_d(X_m)(X_m - X_{m0}) \quad (10)$$

$$M_{bd}\ddot{X}_b + F_{fr}(\dot{X}_b) = B_d\dot{X}_m + K_d(X_m)(X_m - X_{m0}) \quad (11)$$

여기서 M_{bd} 와 M_{id} 는 베이스와 머니플레이터의 틱의 원하는 질량이고, B_d 와 $K_d(X_m)$ 는 원하는 점성 마찰력 계수 및 스프링 계수(stiffness)이고 X_{m0} 는 스프링(K_d)의 초기위치이다. $F_{fr}(\dot{X}_b)$ 는 쿨롱 마찰력을 의미하고 다음과 같이 주어진다.

$$F_{fr} = \begin{cases} 0 & : \dot{X}_b \neq 0 \\ a_{fr} & : \dot{X}_b = 0 \end{cases} \quad (12)$$

여기서 a_{fr} 는 양의 상수이고 쿨롱 마찰력의 크기를 정의한다. 그림에서 L_s 는 작업 선호 영역(preferred operating region)의 경계치를 나타낸다 [13]. 작업 선호 영역은 머니플레이터의 틱을 위치시키고자 하는 작업자가 정의한 특정한 영역이다. 이 영역은 머니플레이터의 과도한 신장과 수축을 방지하기 위하여 조작성 타원(manipulability ellipsoid)이나 조작성 척도(manipulability measure) 등을 이용하여 구할 수 있다 [15]. 또 시스템의 전복을 방지하기 위하여 안정 영역의 경계치로 이 값을 정의할 수 있다. 안정영역은 머니플레이터

와 부하의 무게 중심이 그 안에 존재할 때 시스템이 전복되지 않는 영역이다. 그림 4를 참조하여, 안정 영역은 다음과 같이 구해진다.

$$l \cdot w_b = (\bar{x} - l) \cdot (w_m + w_l) \quad (13)$$

$$\bar{x} = \frac{w_b + w_m + w_l}{w_m + w_l} \cdot l$$

여기서 w_b , w_m 과 w_l 은 베이스, 머니플레이터, 그리고 부하의 질량이고, l 은 베이스의 중심으로부터 베이스의 구동바퀴까지의 길이이고, \bar{x} 는 베이스의 중심으로부터 안정 영역의 경계까지의 길이이다. \bar{x} 가 무게중심에 대하여 표현되어 있는 반면에 L_s 는 머니플레이터의 팁 좌표에 대한 안정 영역의 경계이다. L_m 은 L_s 에 완충영역을 주기 위하여 정의된 영역이다.

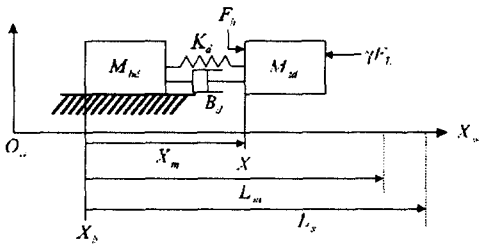


그림 3 가상 임피던스 모델
Fig. 3 Virtual impedance model

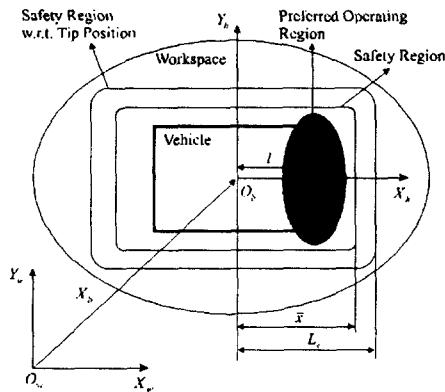


그림 4 안정 영역
Fig. 4 Safety region

그림 3에서 스프링은 비선형 특성을 갖고 있고, 그 스프링 계수는 그림 5와 같이 주어진다. 이제 머니플레이터의 팁이 양의 X-축 방향으로 운동하고 있다고 가정하자. X_m 이 L_m 보다 작은 경우는 스프링의 힘이 제로이고 베이스는 바

닥면에 고정되어 있다. 이 상태를 편의상 모드 A라고 부르기로 하겠다. 모드 A에서의 휴먼 임피던스 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$F_h + \gamma F_L = M_{td} \dot{X}_m + B_d \dot{X}_m \quad (14)$$

이 식은 전형적인 휴먼 임피던스 제어기 (7)식과 같아진다. (14) 식을 (6)식에 대입하면 파워 어시스트 힘 F_a 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_a = -(I - \gamma)F_L + M_{ag}(X) + f_a(X, \dot{X}) + (M_a(X) - M_{td})\ddot{X} + (B_a(X) - B_d)\dot{X} \quad (15)$$

여기서 I 는 단위 행렬(identity matrix)이다. 대부분의 산업용 머니플레이터는 위치 서보를 내장하고 있기 때문에, 다음과 같은 위치 기준 제어 법칙을 적용할 수도 있다. (14)식으로부터, 머니플레이터의 팁의 원하는 가속도 \ddot{X}_d 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{X}_d = (M_{td})^{-1} \{ (F_h + \gamma F_L) - B_d \dot{X}_m \} \quad (16)$$

원하는 속도 \dot{X}_d 는 \ddot{X}_d 를 적분하여 얻어지고, X_d 는 \dot{X}_d 를 적분하여 얻어진다.

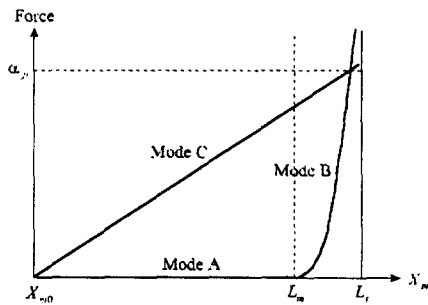


그림 5 비선형 스프링 모델
Fig. 5 Nonlinear spring model

그림 5의 모드 B에서는 X_m 가 L_m 보다 큰 구간이며 작업자는 스프링 K_d 에서부터 오는 반발력을 느낄 수 있다. 이 반발력은 작업자에게 머니플레이터의 팁이 작업 선호 영역의 경계치에 접근하고 있음을 경고하고 작업 선호 영역 안으로 팁을 밀어 넣는 역할을 한다. 또 작업 선호 영역을 안정 영역으로 선정한 경우에는 이 영역 밖에서는 시스템이 전복되므로 작업자가 조작 명령을 주의 깊게 하달하도록 하는 역할을 한다. 이때 휴먼 임피던스 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$F_h + \gamma F_L = M_{td} \dot{X}_m + B_d \dot{X}_m + K_d(X_m)(X_m - X_{m0}) \quad (17)$$

힘 제어 및 위치 제어를 위해서 (15), (16)식과 유사한 식을

언을 수 있다. 모드 B에서 작업자가 베이스를 움직이고자 의도한 경우에는 지속적으로 틱에 힘을 추가하게 되고, 이때 스프링의 힘이 쿨롱 마찰력의 크기보다 커지게 되면 베이스는 움직이기 시작하고 스프링 계수는 모드 C로 전환된다. 모드 C의 스프링은 선형 스프링이므로 초기값 X_{m0} 를 향하여 수축 힘을 발생시키게 되고 베이스와 매니퓰레이터 틱의 상대적 거리 X_m 은 초기값 X_{m0} 으로 되돌아가게 된다

$$F_h + \gamma F_L = M_{td} \ddot{X}_m + \left(\frac{M_{td} B_d}{M_{bd}} + B_d \right) \dot{X}_m + (M_{td} K_d / M_{td} + K_d) (X_m - X_{m0}) \quad (18)$$

윗 식을 (6)식에 대입하여, 힘제어를 위한 파워 어시스트 힘 F_d 를 구할 수 있으며, 위치 제어를 위하여 (10)과 (11)식으로부터 다음과 같은 상태 공간(state space)에서의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{X}_d = A X_d + B u \quad (19)$$

여기서 $X_d = [\dot{X}_m \ \dot{X}_b \ (X_m - X_{m0}) \ X_b]^T$, $u = F_h + \gamma F_L$,

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{B_d}{M_{td}} + \frac{B_d}{M_{bd}}\right) & 0 & -\left(\frac{K_d}{M_{td}} + \frac{K_d}{M_{bd}}\right) & 0 \\ \frac{B_d}{M_{bd}} & 0 & \frac{K_d}{M_{bd}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_{td}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

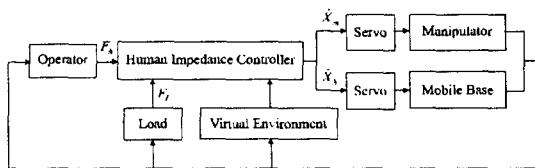


그림 6 제어 시스템의 구조

Fig. 6 Structure of the control system

제작된 실험 장치는 속도 서보를 내장하고 있기 때문에, (19)식으로부터 \dot{X}_m 와 \dot{X}_b 를 구하여 이를 서보의 지령 명령으로 사용한다. 전체 시스템의 제어구조는 그림 6에 나타내었다. 여기서 가상 환경(virtual environment)은 그림 3의 질량(M_{bd}), 댐퍼(B_d), 와 스프링(K_d)로 구성된 임피던스를 의미한다. 매니퓰레이터의 틱의 움직임을 모바일 베이스와 매니퓰레이터의 움직임을 분해하였기 때문에 여유 자유도 문

제를 풀 필요가 없다. 또한 기존의 방식에서는 월드 좌표계를 기준으로 베이스와 매니퓰레이터의 경로를 계획했기 때문에 월드 좌표계에 대한 베이스의 정확한 좌표가 필요했다. 그러나 베이스의 정확한 좌표를 알기가 어려워 이것도 하나의 제어 문제로 대두되었으나, 본 논문에서는 베이스와 매니퓰레이터의 틱의 상대 좌표만을 사용하기 때문에 모바일 베이스의 정확한 위치를 필요로 하지 않는다는 장점도 갖고 있다.

4. 실험 결과

그림 7에 주어진 매니퓰레이터와 모바일 베이스로 구성된 모바일 파워 어시스트 시스템을 이용한 실험 결과를 보이고자 한다. 매니퓰레이터는 7축의 산업용 로봇이고 여기에 2개의 6-축 힘/토크 센서를 장착하였다. 모바일 베이스는 실험용으로 제작한 전방향(omnidirectional)의 홀로노믹(holonomic) 기구부를 가지며 3축의 시스템이다. 크기는 폭이 0.6 (m), 깊이가 0.7 (m), 높이가 1.2 (m)이고 무게는 120 (kg)이다. 실험에서 매니퓰레이터는 지면에 대하여 수직면($X_w - Z_w$ 면)위에서 움직이고, 작업자는 5(kg)의 부하를 운반하기 위하여 양의 X_w -축 방향으로 틱을 움직이고 있다고 가정한다. 실험에 사용된 베이스의 무게가 커서 안정 영역이 충분히 크기 때문에 작업 선호 영역은 매니퓰레이터의 작업 영역에 맞춰서 선정하였다. 비선형 스프링의 파라미터는 다음과 같이 선정하였다.

$$L_m = 0.13(m), L_s = 0.23(m), X_{m0} = 0.67(m), \alpha_f = 25(N)$$

그림 5의 모드 C의 스프링 계수는 140(N/m)으로 선정하였고 모드 B는 선형 스프링으로 가정하여 스프링 계수를 500(N/m)로 선정하였다. 가상 임피던스 모델의 파라미터는 $M_{td} = 5.5$ (kg), $M_{bd} = 30$ (kg), $B_d = 20$ (N·sec/m)로 선정하였다. 매니퓰레이터의 초기 위치는 X_{m0} 이고 작업자가 양의 X_w -축으로 힘을 가함에 따라 매니퓰레이터의 틱은 양의 X_w -축 방향으로 움직인다. 매니퓰레이터의 틱의 위치가 L_m 보다 커지게 되면, 즉 모드 B에 들어가게 되면 그림 8에 보인 바와 같이 작업자는 점점 더 큰 반발력을 느낄 수 있으며 이 힘은 틱을 작업 선호 영역 안으로 밀어 넣는 역할을 한다. 작업자가 베이스를 움직이고자 의도하는 경우는 쿨롱 마찰력의 크기 α_f 보다 더 큰 힘을 부과하게 되고 스프링 모델은 그림 8의 3초 부근에서 모드 C로 전환된다. 이 순간에 그림 9에 보인 바와 같이 모바일 베이스는 움직이기 시작한다. 그림 10는 매니퓰레이터의 틱의 위치를 보이고 있다. 선 'a'는 월드 좌표계에 대한 위치이고 선 'b'는 베이스 좌표계에 대한 위치이다. 그림에서 매니퓰레이터의 틱은 3초경부터 초기 위치를 향해 되돌아오기 시작함을 알 수 있다. 그림 11과 12는 Z_w -축 방향의 조작용 힘과 부하힘을 표시하고 있다. 부하비가 0.1이기 때문에 작업자의 힘이 10배 증폭되어 부하에 가해지고 있음을 알 수 있다.

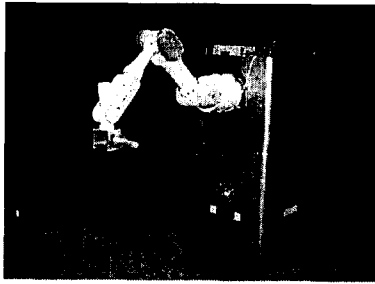


그림 7 실험장치
Fig. 7 Experimental setup

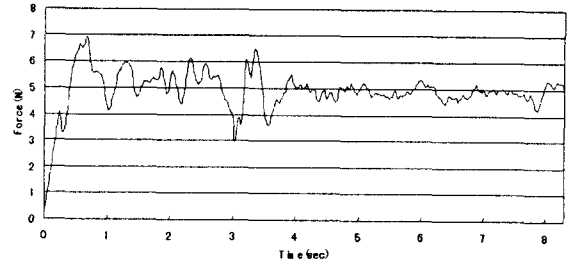


그림 11 Z 축 방향의 조작력(F_{hz})
Fig. 11 Z-axis component of operational force(F_{hz})

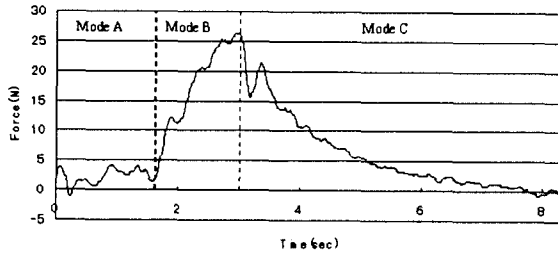


그림 8 X-축 방향의 조작력(F_{hx})
Fig. 8 X-axis component of operational force(F_{hx})

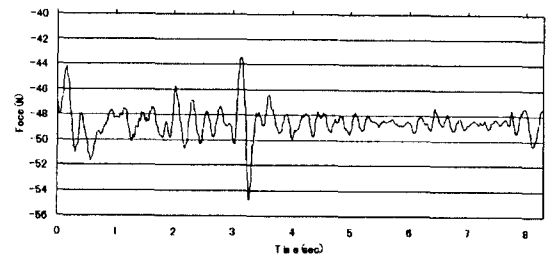


그림 12 Z 축 방향의 부하힘(F_{Lz})
Fig. 12 Z-axis component of load force(F_{Lz})

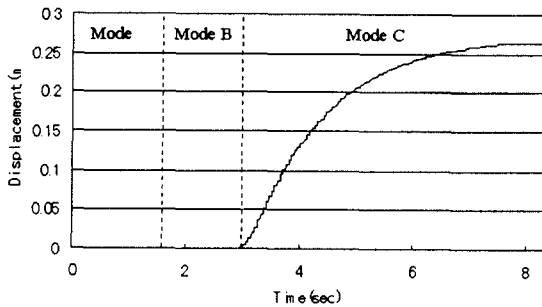


그림 9 모바일 베이스의 이동(F_{hx})
Fig. 9 Displacement of the mobile base(F_{hx})

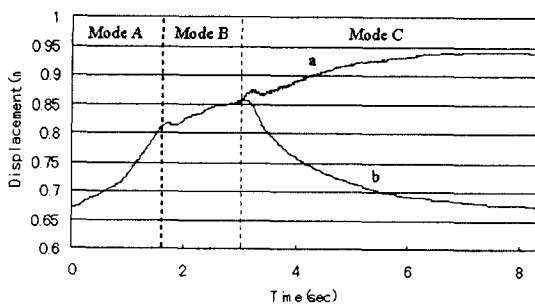


그림 10 팁 위치의 이동(플롯 'a' : X, 플롯 'b' : X_m)
Fig. 10 Displacement of the tip position(plot 'a' : X, plot 'b' : X_m)

5. 결 론

본 논문에서 모바일 파워 어시스트 시스템에 관한 새로운 제어 방식을 제안했다. 모바일 베이스의 불필요한 움직임을 제거하기 위하여, 휴먼 임피던스 제어기로서 마찰을 가진 질량-댐퍼-스프링 임피던스를 도입하였다. 이 임피던스는 머니플레이터의 팁의 움직임을 머니플레이터의 움직임과 모바일 베이스의 움직임으로 분해하여 시스템의 여유자유도 문제를 해결하였다. 모바일 베이스는 머니플레이터의 팁이 작업 선호 영역안에 있을 때는 고정되어 있고, 작업자가 베이스를 움직이고자 하는 의도가 있을 때만 움직인다. 그리고 작업 선호 영역의 경계면에서는 가상의 스프링에 의한 힘제환에 의하여 작업자 경계면을 느낄 수 있으며 이는 머니플레이터 팁을 작업 선호 영역안으로 밀어 넣는 역할도 하고 있다. 알고리즘의 효율성을 확인하기 위하여 실제 실험을 통하여 결과를 확인하였다. 제안한 가상의 임피던스를 이용한 협조 제어 방식은 작업자의 힘만을 고려하여 모바일 베이스와 머니플레이터의 팁의 경로를 분배하는 방식으로 토크에 대한 고려는 없으므로 추후과제로서 토크까지 고려한 방식을 고안할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] J.S. Miller, "The Myotron - A Servo-Controlled Exoskeleton for The Measurement of Muscular Kinetics", *Cornell Aeronautical Laboratory Report*,

VO-2401-E-1, 1968.

[2] R.S. Mosher, "Handyman to Hardiman", *Automotive Engineering Congress*, SME670088, 1967.

[3] H. Kazerooni, "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals -Part. I: Dynamics and Control Analysis", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1632-1640, 1989.

[4] H. Kazerooni, "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals -Part. II: An Experimental Analysis", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1641-1647, 1989.

[5] H. Kazerooni and S.L. Mahoney, "Dynamics and Control of Robotic Systems Worn by Humans", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 133. No. 3, pp. 379-387, 1991.

[6] Y. Hayashibara, K. Tanie, H. Arai, and H. Tokashiki, "Development of Power Assist System with Individual Compensation Ratios for Gravity and Dynamic Load," *Proc. of IEEE IROS*, pp.640-646, 1997.

[7] Y. Hayashibara, K. Tanie, and H. Arai, "Design of a Power Assist System with Consideration of Actuator's Maximum Torque", *Proc. of IEEE Inter. Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 379-384, 1995.

[8] Y. Hayashibara, K. Tanie, and H. Arai, "Power Assist System - A Proposed Method with Consideration of Actuator Saturation-", *Proc. of Ninth Congress on the Theory of Machines and Mechanism, Italy*, pp. 1370-1375, 1995.

[9] U.M. Nassal, "An Approach to Motion Planning for Mobile Manipulation", *Proc. of IEEE IROS*, pp. 831-838, 1993.

[10] H. Seraji, "Configuration Control of Rover-mounted Manipulators", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2261- 2266, 1995.

[11] H. Seraji, "An On-line Approach to Coordinated Mobility and Manipulation ", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 28-33, 1995.

[12] O. Khatib, "Inertial Properties in Robotic Manipulation: An Object-Level Framework", *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 14, No.1, pp. 19-36, 1994.

[13] T. Fukuda, et al., "Manipulator/Vehicle System for Man-Robot Cooperation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 74-79, 1992.

[14] Y. Yamamoto and X. Yun, "Control of Mobile Manipulators Following a Moving Surface," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1-6, 1993.

[15] O. Khatib, "A Unified Approach to Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation," *IEEE Journal of Robotics and*

Automation, Vol. 3, No. 1, pp. 45-53, 1987.

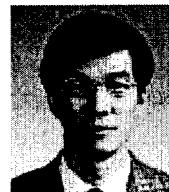
[16] T. Yoshikawa, *Foundation of Robotics: Analysis and Control*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.

저 자 소 개



이 형 기 (李炯機)

1966년 11월 10일 생. 1990년 고려대 공대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1998년 10월~1999년 9월, 일본 기계기술연구소(MEL) Post Doc., 현재 삼성종합기술원 IP sector, HCI Lab. 전문 연구원



성 영 휘 (成永輝)

1962년 5월 20일생. 1988년 고려대 공대 전자공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1995년 9월~1996년 8월, 영국 Oxford Univ. Dept. of Engineering Science Post Doc. 1996 ~ 1997 LG 종합기술원 선임연구원. 1998년 ~ 현재 금오공과대학교 전자공학부 전임강사성영휘
Tel : 0546-467-4268, Fax : 0546-467-4321
Email : ywsung@knut.kumoh.ac.kr



정 명 진 (鄭明振)

1950년 1월 31일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 미국 미시간대 ECE 졸업(석사). 1983년 동 대학원 CICE졸업(공학박). 1976년 국방과학연구소 연구원. 1981년~1983년 미시간대 CRIM 연구조교. 1983년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수