

힘 반향 6자유도 수동조작기의 설계연구 Design of a 6-DOF force reflecting hand controller

변 현희*, °김 한성*, 최 용제**, 김 승호***

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계설계학과

*** 한국원자력연구소

Abstract : A force reflecting hand controller can be used to provide more realistic information to the operator of a teleoperation system such as kinesthetic feedback from a slave robot. In this paper, a new design concept of a force reflecting 6-DOF hand controller utilizing the kinematic structure of a Stewart Platform is presented. Based on the optimal design technique of a Stewart Platform, a force reflecting hand controller has been designed and constructed to verify the technical feasibility of proposed design concept. In order to provide an operator with kinesthetic feedback information, a force mapping algorithm based on a reciprocal product of screws has been introduced. Finally, the technical feasibility of the design concept has been demonstrated through some of experimental results of the device under virtual environment on a real-time graphic system.

Keywords : Stewart Platform, 6-DOF, Force reflecting hand controller, Virtual environment, Force mapping

1. 서 론

일반적인 공장내의 단순작업과는 달리 로봇이 작업공간에 대한 기하학적 정보를 가지고 있지 않은 상태이거나, 그러한 정보를 갖고 있는 경우에도, 완전 자동으로 작업수행이 불가능한 환경에서는 인간의 판단에 의존한 작업의 지시가 필요하다. 따라서 로봇의 원격제어를 위한 시스템을 구성하는데 있어서 로봇의 운동제어를 위한 명령 입력장치의 개발은 필수적이며 이러한 명령 입력장치의 성능은 전체 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요인이다. 적절한 작업지시를 위하여 작업상황을 나타내는 정보(시각, 청각)들을 실시간으로 조작자에게 제공하는 것이 바람직하는데 특히, 작업 상황을 조작자에게 인식시키는 부가적인 수단으로써, 근 감각적인(kinesthetic) 피드백은 작업 상황에 대한 추가적인 정보를 제공하여 조작자의 판단을 최적화 시킬 수 있으므로 이를 구체화하는 힘 반향 조작기의 개발은 매우 중요하다. 힘 반향 조작기의 개발은 외국의 경우 오래 전부터 수행되어 여러 종류의 시스템이 개발되어 왔으나[1-5] 큰 체적과 중량, 그리고 범용적이지 못하며 이동성이 작다는 몇 가지 단점을 가지고 있다.

이러한 단점들을 보완하기 위하여, 본 연구에서는 기구의 범용화, 경량화 그리고 소형화를 힘 반향 범용 수동조작기 제작의 기본 설계 개념으로 하였다. 수동조작기로서 요구되는 사항들을 분석하여, 이를 만족시키는 기구로서 스투잇트 플랫폼을 선정하였으며 최적형상을 고려한 기구의 칫수설계 후, 스투잇트 플랫폼형 힘 반향 6자유도 범용 수동조작기를 실제 제작하였다. 제작된 수동조작기의 적용을 위하여 수동조작기와 제어되는 로봇의 운동학 해석을 수행하였고 반향해야 할 힘과 사상 알고리즘에 대하여 연구하였다. 수동조작기의 제어를 위하여 PC를 기반으로 하는 실시간 제어를 설계하였다. 이렇게 설계, 제작된 힘 반향 수동조작기를 그래픽 컴퓨터상에 실시간으로 재현될 제어 대상 로봇과 가상 환경(virtual environment)에 접속하여 실험함으로써, 연구의 결과로 제시할 힘 반향 범용 6자유도 수동조작기의 설계 방안에 대한 기술적 실현성을 입증하였다.

2. 힘 반향 수동조작기의 기구학적 설계

2.1 기구의 선정

원격조정 로봇시스템의 입력장치로 사용될 수동조작기가 갖추어야 할 요구조건[6]들 중에서 특히 다음의 사항들을 고려하였다. 먼저, 임의의 로봇을 제어하기 위하여 수동조작기는 6자유도 기구이어야 하며, 특정 로봇의 기하적 형상에 의존하지 않는 범용성과, 기하학적 불균형성이 최소로 나타날 수 있는 기구를 선택하도록 하였다. 또한, 비교적 높은 강성을 갖고, 위치오차의 누적에 의한 부정확한 제어정보의 입력을 최대한 배제할 수 있도록 하기 위하여 병렬형 기구로 선택하였다. 이러한 기본적인 사항들을 만족하는 기구로서 스투잇트 플랫폼을 선정하고, 특히, 와이어와 풀리를 이용하는 구동 메커니즘의 사용으로 기구부에 장착되는 부품수를 최소화함으로써 제작상의 용이성 또한 고려하도록 하였다.

설계 대상 기구로 선정된 스투잇트 플랫폼의 기구학적인 형상은, 각 다리를 구성하는 조인트의 배치순서와 상하부판에 고정시킨 조인트의 배치 형태에 따라 3-3형, 6-3형, 6-6형, 4-4형, MSP형(Modified Stewart Platform)과 Merlet이 제시한 형태[6](Fig. 1 참조)로 구분할 수 있다. 이 외에 1자유도를 갖는 선형 조인트(prismatic joint) 대신에 회전 조인트를 적용한 형태[7]도 있다. 이러한 여러 가지 서로 다른 기구적 구조중에서 특히, 3-3형 또는 4-4형 스투잇트 플랫폼의 경우, 상판과 하판을 연결하고 있는 각각의 다리에 선형구동기가 배치되어 있는 반면에, Merlet형의 경우에는 각각의 다리는 일정한 길이로서 고정되고, 선형구동기가 하판(base platform)에 연결되는 형태로서, 와이어와 풀리를 사용하는 선형구동기의 설계시 제작상의 용이함을 제공하는 장점을 갖는다. 본 설계에서는 이러한 제작상의 용이성을 중시하여 힘 반향 수동조작기로서 적합한 스투잇트 플랫폼의 형태로서 Merlet형을 선정하도록 하였다.

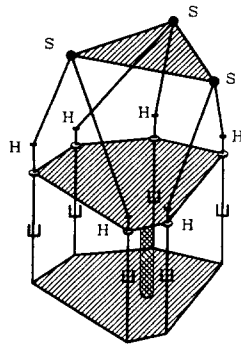


Fig. 1. Merlet-Type Stewart Platform

2.2 기구부의 설계

스튜어트 플랫폼은 기구 치수들에 따라, 기구의 특이성을 나타내는 조작성과 상관이 도달할 수 있는 범위를 나타내는 작업영역의 측면에서 큰 차이를 나타낸다. 그러므로 스튜어트 플랫폼의 기구부 설계에 있어서, 최적의 기구 치수를 산출하는 것이 매우 중요하다. 이 기구의 설계에서 고려해야 할 기구 치수로는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 상판의 반경(r_p), 하판의 반경(r_b), 상판에 고정될 조인트의 인접 각도(ϕ_p), 하판에 고정될 조인트의 인접 각도(ϕ_b), 선형 조인트의 최대 및 최소변위(Δl) 그리고 고정된 다리부의 길이(l_f)가 있다. 이러한 치수들을 결정하기 위하여 작업영역내에서 나타나는 기구의 특이성과 작업영역을 고려하였다.

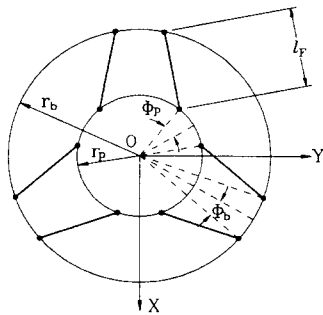


Fig. 2. Design parameter

기구가 특이한 기하학적 자세를 취하는 특이점(singular point)에서는 조작기를 제어할 수 없게 되는데, 이것은 제어시 이용되는 중요한 정보중 속도 또는 정역학적 관계를 나타내는 자코비안의 역행렬을 구할 수 없기 때문이다. 따라서 기구의 치수 설계 시에는, 작업영역 내에서 특이점의 발생이 최소화 될 수 있는 기하학적 형태로 수동조작기를 설계하는 것이 중요하다. 이를 위하여, 본 연구에서는 스튜어트 플랫폼의 최적설계에 대한 연구결과 [8]로 제시된 바 있는 조작지수(Dexterity Index, DI)의 개념을 사용하였다. 먼저, 이 기구의 속도 자코비안을 J 라 하면 J 의 각 열(column)은, 고정좌표계에서 표현된 각 다리방향의 선 벡터 $\$i$ ($i=1, \dots, 6$)를 나타내므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = [\$1, \dots, \$6] = \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & s_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{61} & \dots & s_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이제, 행렬 A 를 다음과 같이 정의한다.

$$A \triangleq J^T \Delta J \quad (2)$$

여기서 $\Delta = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 이고, A 는 대칭 행렬이므로 식 (3)과 같이 대각화(diagonalize) 할 수 있다.

$$A = V D V^T \quad (3)$$

식 (3)에서 V 는 A 의 고유벡터(eigenvector)로 구성되는 행렬이며, D 는 행렬 A 의 고유값(eigenvalue) d_i 로 구성된 대각행렬이다. V 를 이용하여 다음식과 같이 U 를 정의한다.

$$U \triangleq J V \quad (4)$$

J 가 특이해 지는 경우, 수정 특이값 분해(modified singular value decomposition)[9]를 이용하여 식 (5)와 같이 분해될 수 있다.

$$J = U V^T \quad (5)$$

이것을 다시 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = [U_1 | U_2] V^T \quad (6)$$

식 (2)와 (3)으로부터 $J^T \Delta J = V D V^T$ 임을 알 수 있고 $U^T \Delta U = D$ 이므로 다음식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \end{bmatrix} \Delta [U_1 | U_2] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

즉, 로봇의 자세가 특이해져서 J 가 차수(rank)를 잃을 때에는 $|d|_{\min} = 0$ 이 되고, 자세가 특이점에 가까워 질 때는 $|d|_{\min} \cong 0$ 이 되므로 $|d|_{\min}$ 을 로봇이 특이점에 가까워지는 정도로 보아, 조작지수(DI)를 식 (8)과 같이 정의하였다[10]. 이 때 A 는 양의 한정(positive definite) 행렬이 아니므로 $|d|_{\min}$ 에 절댓값을 취하도록 하였다.

$$DI \triangleq |d|_{\min} \quad (8)$$

이와 같이 특이점과의 거리로 정의된 조작지수와 작업영역을 설계변수에 대해 다음과 같이 검토하였다.

■ 조작지수 : 상하판의 치수결정은, Merlet형 스튜어트 플랫폼의 기하적형상을 살펴보기 위하여 선형구동기의 변위를 고정된 상태에서의 조작지수를 참고하였다. 즉, Fig. 3(a)와 같이, 상하판의 비율이 0.5인 경우를 정점으로 조작지수는 감소하였으며, ϕ_b 와 ϕ_{prk} 커질수록 조작지수가 감소하게 된다. 따라서, 이러한 조작지수의 경향을 고려하여 상하판의 비율이 0.5인 3-3형이 최적의 기하적형상을 알 수 있다.

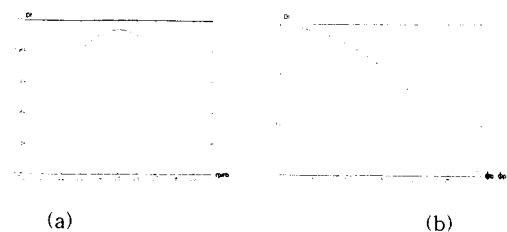


Fig. 3. Tendency of DI

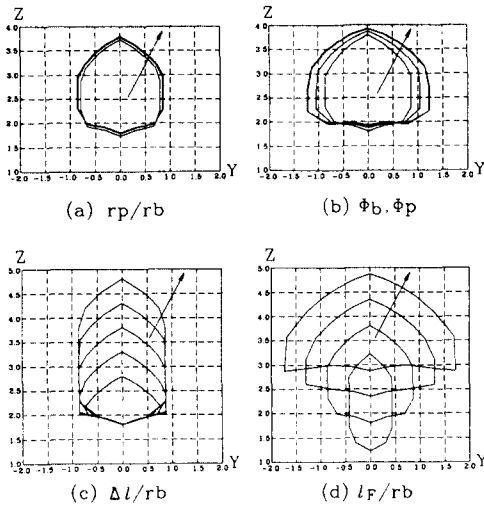


Fig. 4. Workspace tendency for design parameters

■ 작업영역 : Merlet형 스튜어트 플랫폼의 작업영역은 Fig. 4에 서 보는 바와 같이, 상하판 반경비의 변화에 대해서는 큰 차이가 없었고[Fig. 4(a)], Δl 과 하판의 ϕ_b , ϕ_p 가 증가할수록 큰 작업영역을 가지며[Fig.4(b), Fig. 4(c)], l_f 가 커지면 작업영역이 Z방향으로 치우치고 Y방향으로 넓게 분포하는 것으로 나타났다.[Fig. 4(d)] 즉, 동일한 l_f 과 Δl 에 대하여 작업영역의 전지에서 본 최적의 형태는 6-6형이라고 볼 수 있다.

■ 제작성 : 앞서 살펴본 두가지 형태에 대한 제작의 용이성을 고려하면 조작지수측면에서 유리한 3-3형의 경우는, 인접한 두 개의 혹은 조인트를 한점에 모아 제작하는 것이 어렵고, 한 개의 축상에 두 개의 선형구동기를 동시에 배치하는 것이 매우 어렵다.

이러한 제작상의 어려움과 작업영역과 조작지수에 대한 최적의 기구형태는 서로 상반되는 특성을 갖는다는 점을 감안하여, 요구되는 크기의 작업영역이 만족되도록 기구부의 칫수를 결정한 후, 상하판에서 서로 인접한 조인트의 각 ϕ_b 와 ϕ_p 를 최소화함으로써, 기구의 특이성 측면에서 최적의 형상으로 제시된 3-3형에 가까운 형태가 되도록 하였다. 최종 조립된 수동조작기의 외형은 Fig. 5와 같다.

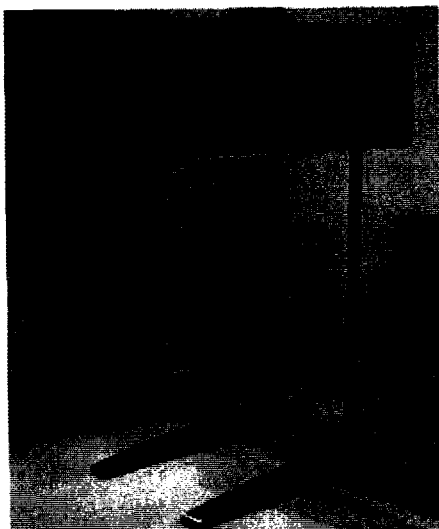


Fig. 5 Assembled hand controller

3. 조작기의 힘 사상과 제어 알고리즘

3.1 힘 사상

(1) 장애물과의 접촉시 로봇의 선단에 가해지는 힘

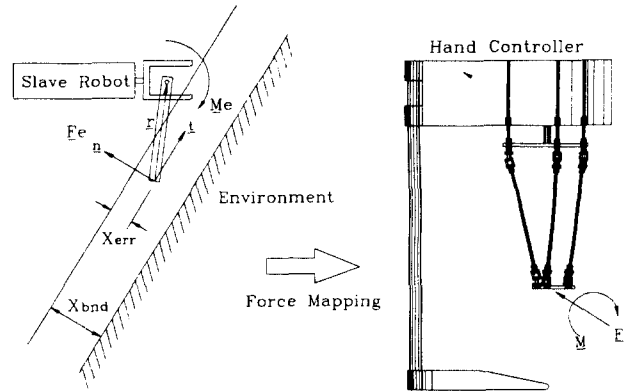


Fig. 6 Mapping algorithm for obstacle

로봇의 손이나, 잡고 있는 작업물이 장애물과 접촉할 경우는 손에는 Fig. 5과 같이 F_e , M_e 외력이 가해진다. 조작자로 하여금 이를 인식시키기 위해서 식 (9), (10)과 같은 비례 미분형의 위치제어 방법을 통하여 조작기의 손잡이로 힘을 반향시킨다.

$$F_e = \begin{cases} (K_p x_{err} + K_D \dot{x}_{err})_n & : x_{err} \geq 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (9)$$

$$M_e = \begin{cases} F_e \times r & : x_{err} \geq 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

수동조작기의 상판에 가해지는 렌치(\hat{w}_e)를 로봇의 손에서 발생하는 외력의 방향과 동일하게 하였다.

$$\hat{w}_e = \begin{bmatrix} F_e \\ M_e \end{bmatrix} \quad (11)$$

J_s 를 수동조작기의 속도변환 행렬로, τ_m^{js} 을 수동조작기의 모터에서 요구되는 토크라고 할 때, 평행기구의 정역학적인 관계식으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$\tau_m^{js} = (J_s)^{-1} \hat{w}_e \quad (12)$$

이렇게 계산된 τ_m^{js} 를 수동조작기로 입력될 힘 명령치로 사용함으로써 수동조작기의 핸들에서 힘을 느끼도록 할 수 있다.

(2) 제어대상 로봇의 관절 작동 범위를 초과하는 경우

본 연구에서와 같이 임의의 로봇을 원격 제어하는 범용 수동조작기의 사용시, 큰 운동(gross motion)과 미세 운동(fine motion)을 반복 조정하는 과정 중, 수동조작기는 조작자가 원하는 방향으로 움직일 수 있으나 제어되는 로봇은 관절의 회전 한계각(joint limit angle)을 초과하여 더 이상 움직일 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 수동조작기의 위치 명령 입력값으로 제어되는 로봇이, 회전 한계각을 초과하는 경우를 조작자에게 인식시키

는 과정은 효율적인 경로계획과 로봇의 파손을 방지하기 위하여 필수적인 작업이다. 이와 같은 과정은 먼저, 제어되는 로봇이 회전 한계각에 가까워질 때, 방사 좌표계(ray coordinate)[10]로 표현된 로봇 손의 트위스트(twist) \hat{t}_{nou} 를 계산하고, 이 자세에서 얻어지는 자코비안 행렬 J 를 이용하여 각 조인트의 회전속도 $\hat{\theta}_{nou}$ 를 구하는 것으로 시작된다. 이러한 각 조인트의 회전 속도 중 회전 한계각에 도달한 관절들의 회전 속도를 영으로 한다. 이렇게 하여 구한 각 조인트의 회전속도 벡터 $\hat{\theta}$ 과 자코비안 행렬을 이용하여 제어되는 로봇 손의 트위스트 \hat{t} 를 구한다. 여기서, 로봇이 회전 한계각에 도달했을 경우, 수동조작기의 조작자에게 그 방향으로의 더 이상의 위치 명령을 입력하지 못하도록 하기 위하여 힘을 반향해야 할 필요가 있다. 즉, 반향하는 힘의 방향은 원격조정 대상 로봇의 일률(power)이 영이 되도록 계산되어야 하며, 이는 위에서 구한 대상 로봇의 트위스트 \hat{t} 와 방사 좌표계(ray coordinate)로 표현된 로봇의 렌치(wrench) \hat{w} 와의 역곱(reciprocal product)을 수행함으로써 계산되는데 이것은 다음의 식 (13)과 같이 표현된다.

$$POWER = \hat{w} \circ \hat{t} = 0 \quad (13)$$

여기서, ω 와 v 를 각각 로봇 손의 각속도 및 선속도라 하고, f 와 m 을 각각 로봇 손에 작용하는 힘과 모멘트라 하고, 방사 좌표계로 표현된 로봇의 트위스트와 렌치는 다음과 같이 표현할 수 있다(Fig. 7 참조).

$$\hat{t} = [\omega; v] = [s_1; s_{01}] = [s_1; r_1 \times s_1 + h_1 s_1] \quad (14)$$

$$\hat{w} = [f; m] = [s_2; s_{02}] = [s_2; r_2 \times s_2 + h_2 s_2] \quad (15)$$

이때 h_1 및 h_2 는 각각 \hat{t} 와 \hat{w} 의 피치(pitch)를 나타낸다. 이제, 위에서 정리한 트위스트와 렌치를 이용하여 역곱을 계산하면 다음 식 (16)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{w} \circ \hat{t} &= m^T \cdot \omega + f^T \cdot v \\ &= s_1^T \cdot s_{02} + s_2^T \cdot s_{01} \\ &= s_1^T \cdot (r_2 \times s_2 + h_2 s_2) + s_2^T \cdot (r_1 \times s_1 + h_1 s_1) \\ &= (r_1 - r_2)^T \cdot (s_1 \times s_2) + (h_1 + h_2) s_1^T \cdot s_2 \end{aligned} \quad (16)$$

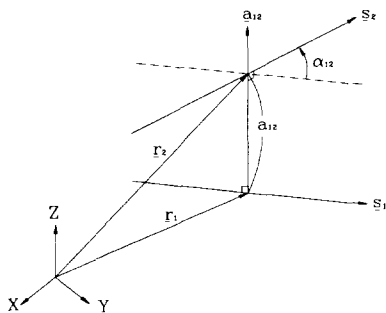


Fig. 7. Definition of screw variables

윗 식에서 보는 바와 같이 역곱은 나선의 축들이 서로 수직으로 교차하는 경우($r_1 = r_2, s_1^T \cdot s_2 = 0$)이거나, 또는 축들이 서로 평행하여 $h_1 + h_2 = 0$ 인 경우에 영이 됨을 알 수 있다. 이들 중,

본 연구에서는 대상 로봇의 일률이 영이 되는 경우 중에서 로봇 손의 운동방향에 반대되는 방향으로의 힘을 수동조작기의 핸들에 가하기 위하여 나선 축이 서로 평행($\alpha_{12} = \pi$)하는 경우의 렌치를 구하고, 이에 적절한 힘 이득을 곱하여 수동조작기의 상판에 가할 렌치로서 결정한다. 이것을 수동조작기의 정역학적 관계를 이용하여 조작기의 각 선형구동기에 필요한 힘(braking force)에 산출하여 회전 한계각을 피하기 위한 수동조작기로서의 힘의 반향 방법을 제시한다.

3.3 제어 알고리즘

가상 환경에 대한 실험을 수행하기 위하여 Fig. 8과 같은 수동조작기의 제어 알고리즘을 구성하였다. 위의 그림에서 q_n 는 직교좌표계 상에서 나타낸 수동조작기 손잡이의 위치를 나타내며 제어 대상 로봇으로 전달되는 위치정보와 동일하다. 따라서 작업도중 가상환경에 로봇의 충돌이 예측되는 경우는 조작기에 힘을 가하여 로봇으로 전달될 로봇 손의 위치값이 환경에 근접하지 않도록 조작기를 제어하는 것을 목적으로 한다. q_n 는 접촉시 환경정보를 바탕으로 하여 계산된 수동조작기의 제어 위치이다.

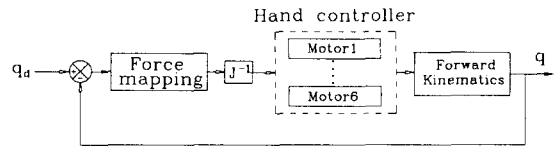


Fig. 8. Control block diagram

4. 시스템의 구성

4.1 가상 작업환경을 위한 그래픽 시스템의 구성

제작된 조작기의 효율성을 실험하고 그 결과를 입증하기 위하여, 가상 작업을 가상화하기 위한 그래픽 시스템을 구성하였다. 실시간 그래픽 소프트웨어는 Silicon Graphics사의 Iris Indigo 상에서 C 언어를 사용하여 작성되어 운영되며, 수동조작기의 제어기로 사용되는 PC(supervisory controller)에 의해 계산된 그래픽 정보가 RS232C에 의한 데이터 송신으로 그래픽 시스템에 전송된다. 이러한 그래픽 시스템에서는 조작자에게 효율적인 시각 정보를 제공하기 위하여 마우스를 이용한 뷰포트(view port) 설정이 가능하도록 하였고, double-buffer mode와 z-buffer를 이용함으로써 애니메이션 속도를 증가시킬 수 있었다. 모니터상에 재연되는 그래픽 데이터는 초당 25개의 프레임의 속도로 처리되며 그래픽 시스템을 포함하는 전체 시스템의 시간계획(time scheduling)은 주 제어기인 PC에 의해 작성되고 통제된다.

4.2 PC를 이용한 제어기의 구성

1대의 PC만을 사용하여 제어에 필요한 모든 연산을 수행하는 경우에는, 최대 25Hz의 속도로 샘플링이 가능하므로 적절한 제어효과의 구현을 위하여 Fig. 9에서 보는바와 같이 두 대의 PC를 병렬 통신을 이용하여 데이터를 송수신하는 시스템을 구성하였다. 이것은 주 제어기에 부가될 연산량과 그래픽 데이터의 전송에 필요한 시간을 최소화하기 위한 개념으로서, 그래픽 데이터의 전송과 수동조작기의 관절 제어를 개별화 한 것이다. 정확한 샘플링과 시간계획(time scheduling)을 위하여 PC에 내장된 타이머를 이용하였다.

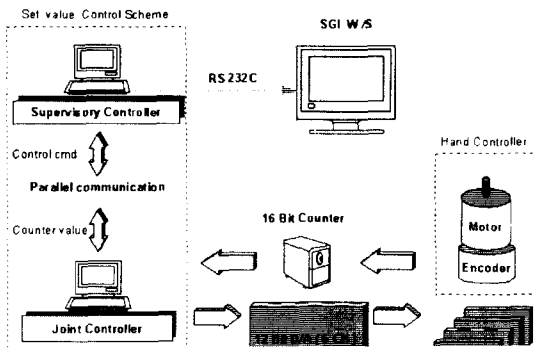


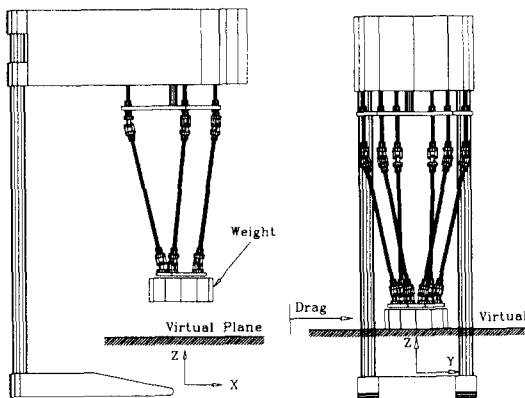
Fig. 9 Hardware configuration

5. 실험 및 결과분석

5.1 실험 방법

수동조작기의 명령에 의하여 움직이는 로봇의 손이 일정한 가상평면에 접촉하는 경우에 대하여 앞서 언급한 제어 알고리즘을 사용하여 실험을 수행하였다. 가상평면은 z 방향의 위치가 340mm인 x-y방향의 무한평면을 선정하여 실험하였다. 일반적으로 수동조작기의 조작시, 가상환경으로 인해 반향되는 힘은 조작기의 측면에서 볼 때 정하중이 아닌 충격하중이다. 따라서 이러한 하중에 대한 응답특성을 실험하기 위하여 첫 번째 실험으로 Fig. 10(a)과 같이 1.2Kg(11.7N)의 추를 수동조작기의 손잡이에 매달고 상판의 최고 위치(378mm)에서 낙하시키는 실험을 수행하였다. 이때 손잡이가 가상평면에 접촉하여 정상상태에 도달할 때 까지의 z값을 정확한 샘플링으로 시간의 증가에 따라 확인하였다.

두 번째 방법으로 Fig. 10(b)과 같이 가상평면에 도달하여 정상상태에 있는 경우 조작기의 y축 방향으로 가이드를 따라서 손잡이를 밀었을 때 계산된 z 방향의 위치를 확인하였다. 두 실험들은 비레이드와 미분이득을 바꾸어 가면서 실험하였다.



(a) Experiment 1. (b) Experiment 2.

Fig. 10. Experimental method

5.2 결과 및 분석

Fig. 11은 실험1의 결과를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 직선으로 나타난 것은 z=340mm 인 가상평면을 나타내며 직선 아래로 내려간 부분은 오차를 나타낸다. 비레이드가 클수록 처음 평면에 접하였을 때 발생한 최대오차가 작고 정상상태에 도달하는

시간이 짧음을 알 수 있다. 위의 실험결과를 간단히 Table 1에 정리하였다.

■ 실험1의 결과 :

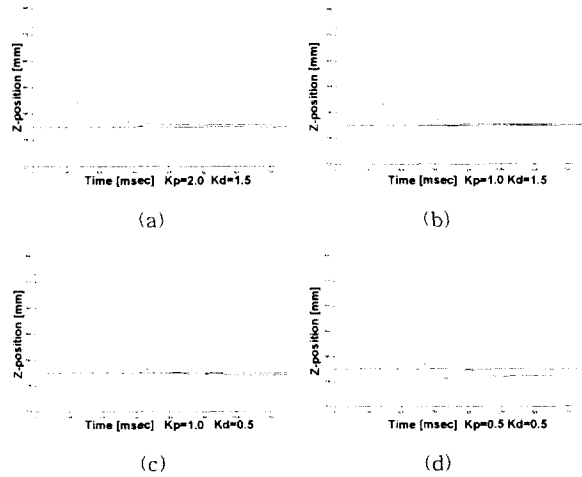


Fig. 11. Experimental result 1

Table 1. Response characteristics for experiment 1

	(a)	(b)	(c)	(d)
Steady state z-value (mm)	340.83	340.47	339.18	337.35
Time in steady state (sec)	1.08	1.10	1.56	1.52
Maximum overshoot (mm)	6.2	7.3	10.0	12.1

■ 실험2의 결과 :

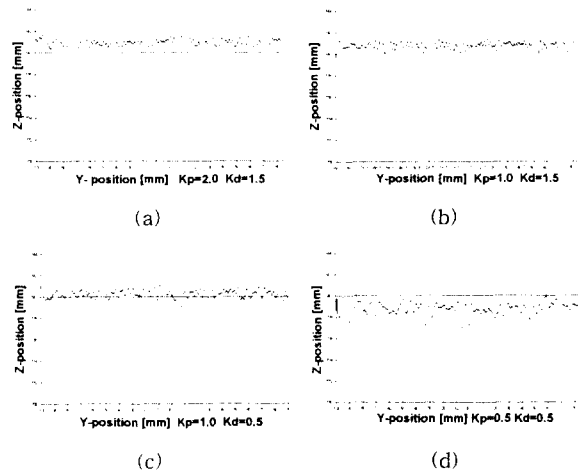


Fig. 12. Experimental result 2

Table 2. Response characteristics for experiment 2

	(a)	(b)	(c)	(d)
Average z-value (mm)	340.92	340.78	340.24	338.92
Max. z-value (mm)	341.65	341.43	341.11	340.05
Min. z-value (mm)	340.12	339.51	339.04	337.33

위에서 정리된 결과를 보면 모든 경우에 대해 정상상태 오차가 발생하는데 이것은 미소한 제어출력은 구동부의 마찰로 야기되는 불감대(dead zone)에 흡수되기 때문이다. 이득을 증가시킴으로써 가상평면 이하로 내려오지 않도록 성능을 개선할 수 있으나 심한 채터링을 유발시키므로 좋지 못하였다. 채터링을 줄이면서 가상벽에 대해 최대 위치오차를 줄일 수 있는 방법으로는 비례이득을 작게 하고 원하는 제어위치를 가상벽에서 앞쪽으로 위치시키는 것이 있다. 그러나 이 방법은 조작자가 느끼는 면이 정확한 평면이 아니라 굴곡이 진 평면이라는 단점을 갖는다. 실험시 가장 문제가 마찰성분 중에서 동마찰은 구동부의 속도를 이용한 피드포워드(feedforward)로서 보상 가능하였고, 실제로 양호한 조작감을 얻을 수 있으나 힘 반향을 위한 제어출력과 마찰을 보상하기 위한 제어출력이 동시에 모터에 가해지는 경우는 약간의 불안정성을 나타내었다. 정마찰은 수동조작기에 반향되는 힘의 감도를 저하시키는 요인이 되며 작동시 조작자의 작동을 용이하게 하기위한 보상도 곤란하였다.

이상의 실험은 제어되는 로봇이 알려진 가상환경과의 접촉이 예상되는 경우, 충격을 방지하기 위한 목적으로 적절한 힘을 조작자에게 반향할 수 있는지의 여부를 검증하기 위하여 수행된 것으로, 앞서 제시한 2가지의 실험결과를 볼 때 양호한 힘 반향을 수행하는 것으로 확인되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 근 감각적인 힘의 반향이 가능한 스투잇트 플랫폼형 범용 6자유도 수동조작기를 설계, 제작하였다. 기구의 설계에 있어서는, 먼저 스투잇트 플랫폼의 여러가지 기하학적 형태 중에서 수동조작기로서 요구되는 기능을 만족시킬 수 있는 형태를 선정하였다. 기구의 첫수설계에서는 작업영역과 조작지수의 개념을 이용한 최적설계를 수행하여 소형, 경량화된 기구를 제작하였다.

수동조작기 손잡이로의 힘 반향은, 이 기구의 정역학적 관계에 근거한 힘 사상 알고리즘에 기초하였으며 실시간 그래픽 환경과 PC를 기반으로 하는 제어기 환경을 구성하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는, 비례 미분형의 위치 제어기를 이용하여 힘을 반향시키는 방법을 채택하였는데 이러한 위치 제어기를 이용한 간접 힘 제어방법은 실험결과로 제시한 바와 같이 정마찰 등으로 인한 정상상태 오차가 발생하기는 하나 양호한 성능, 즉 만족할 만한 힘 반향 조작감을 실현시킬 수 있었다. 고정된 환경에 대해 접촉을 피하기 위하여 정지력을 가하는 경우는, 주어진 이득을 이용하여 예측되는 정상상태 오차만큼을 보정한 제어위치를 선정하거나 적분계인을 추가함으로써 성능이 개선될 수 있다.

참고 문헌

[1] 허훈, 김희국, "첨단 원격 조정 시스템의 개발현황 및 활용에 대하여", 대한 기계학회지, 제31권, 제7호, pp. 590-603, 1990
 [2] B. Regan, "ATLAS-8F Advanced Bilateral Manipulator System", Society of Manufacturing Engineering. Con. Proc. November, 1990
 [3] T. L. Brooks, A. K. Bejczy, "Hand Controller for Teleoperation", JPL Publication. March. 1985.
 [4] C. A. Mason, "Development of a general purpose hand controller for advanced teleoperation", Proc. Int. Symposium Teleoperation and Control. pp. 277-290, July, 1988

[5] T. Arai, S. Hashino, E. Nakano, K. Tani, "Advanced Teleoperation with Configuration Differing Bilateral Master-Slave System" Robotics Research 4th Int. Symposium. 1988, The MIT press Cambridge, Ma, London, England. pp 163-170
 [6] N. Mouly, J. P. Merlet, "Singular configurations and kinematics of a new parallel manipulator", Proc. of the IEEE, Int. Con. on R&A, France, pp. 338-343, May, 1992
 [7] N. Mimura, Y. Funahashi. "A New Analytical System Applying 6 DOF Parallel Link Manipulator for Evaluating Motion Sensation", IEEE Int. Con. on R&A, Nagoya, pp. 227-232, May, 1995.
 [8] 김한성, "스튜잇트 플랫폼의 조작성 연구", 연세대학교 석사 학위 논문, 12, 1995
 [9] L. Romdhane, "Kinestatic Analysis of Multi-Fingered Hands" Ph.D. Thesis, University of Florida, 1989.
 [10] 최용제, "나선이론에 의한 로봇의 운동 및 역학적 해석." 대한 기계 학회 학회지, 제31권, 제7호, pp. 616-625, 1991,
 [11] K. C. Cheok, J. L. Ocerholt, R. R. Beck, "Exact Methods for Determining the Kinematics of a Stewart Platform Using Additional Displacement Sensors", Journal Robotic Systems, pp. 689-707, 1993.
 [12] C. H. An, C. G. Atkeson, J. M. Hollerbach, "Model based control of a robot manipulator", The MIT press Cambridge, Ma, London, England. 1988
 [13] K. J. Waldron, K. H. Hunt, "Series-Parallel Dualities in Actively Coordinated Mechanism", The Int. J. of Robotics Research. Vol. 10, No5, pp. 473-480, October, 1991.