

힘 반향 원격제어 모의시험기 개발에 관한 연구

On the Development of a Testbed for Force-Reflecting Teleoperation

김 상범*, 최 용제**, 김 승호***

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계설계학과

*** 한국원자력연구소

Abstract : In teleoperation of a manipulator, kinesthetic feedback can take an essential role in the sense that it provides an operator with more realistic information. In this paper, in order to implement the concept of kinesthetic feedback, force mapping algorithms based on screw theory have been presented. In the development of such algorithms, the virtual environment has been modeled using a spring and dampers, and the forces caused by hitting the joint limits of a controlled manipulator were considered. Finally, some experimental results of force mapping algorithm have been presented.

Keywords : Stewart Platform, Force reflecting hand controller, Force mapping, Kinesthetic feedback, Teleoperation

1. 서 론

고방사능 환경에서와 같이 인간이 직접적으로 취급하기 어려운 위대한 작업의 수행을 위하여 인간을 대신하는 원격작업 로봇의 운동제어를 위한 시스템은, 일반적으로, 작업로봇, 화상 시스템(vision system), 컴퓨터 그래픽 시스템 및 명령입력장치 또는 수동조작기(hand controller)등으로 구성된다.[1-5]

로봇의 작업환경으로부터 제공될 수 있는 여러 가지 형태의 정보들 중에서도, 특히 근감각적인(kinesthetic) 정보는 로봇의 원격조작에 있어서는 필수적인 정보가 될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 근감각적인 정보의 제공을 위하여, 힘 반향 수동조작기와 작업환경과의 상호작용시 사용될 수 있는 기본적인 힘 반향 모델을 제시하였다. 또한, 제어대상 작업로봇과 작업환경과의 접촉시 발생하는 외부 힘과 작업로봇의 관절 한계각 도달시 수동조작기로의 힘 반향 제어알고리즘을 제시하고, 이를 위하여, 개발된 스투어트 플랫폼형 힘 반향 6-자유도 수동조작기에 적용토록 하였다.[11]

작업상황에 대한 기하적, 물리적인 정보는 주어진 것으로 가정하고 이로부터 가상 작업환경을 그래픽 시스템에 구성하였다. 이러한 가상환경하에서의 힘 반향 알고리즘의 개발을 위하여, 가상환경의 기본적인 접촉모델을 구성하고, 설정된 모델과 제어대상 로봇과의 사이에서 발생하는 접촉력을 수동조작기로 반향시키는 알고리즘을 작성하고 실험을 통하여 그 결과를 검증하였다.

2. 힘 반향 수동조작기

2.1 기구학적 해석

본 연구는, 수동조작기의 기본형태로서 스투어트 플랫폼 기구를 이용하되, 이 기구의 가능한 여러 가지 기하적 형상중에서 Merlet형[6]을 채택하여 제작된 힘 반향 수동조작기를 대상으로 하였다.(Fig. 1 참조) 스투어트 플랫폼의 기본형태인 3-3형인 경

우, 상판과 하판을 연결하고 있는 각각의 다리에 선형구동기가 설치되어 있는 반면에, Merlet형의 경우에는 구동부가 지지고정된 형태로서, 3-3형과 같이 구동부 자체의 구동을 필요로 하지 않는 장점을 갖고 있다. 이러한 Merlet형 힘 반향 수동조작기의 기구학적 특성은 다음과 같다.

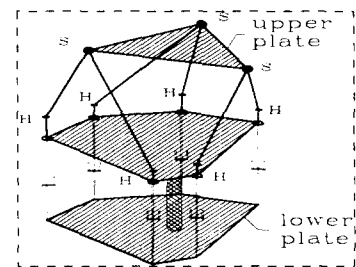


Fig. 1. Merlet-Type Stewart Platform

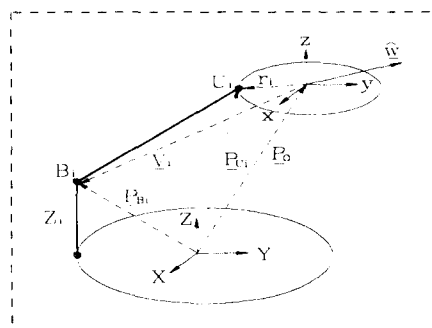


Fig. 2. Kinematic Configuration

(1) 속도 순기구학 해석

Merlet형 스튜어트 플랫폼의 기구해석을 위한 좌표의 설정 및 기구 각 부의 첫수는 Fig.2와 같다.

플뤼커(Plücker)의 축 좌표(axis coordinates)로 표현된 상판의 트위스트(twist) $\hat{T} = [\underline{v}; \underline{\omega}]$ 는, 상하판을 연결하고 있는 i 번째 체인(chain)을 구성하고 있는 관절들의 트위스트 합으로 표현될 수 있으며, 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{T} &= \hat{T}_{1i} + \hat{T}_{2i} + \hat{T}_{3i} + \hat{T}_{4i} + \hat{T}_{5i} + \hat{T}_{6i} \\ &= \hat{T}_{1i} + \omega_{2i} \hat{S}_{2i} + \omega_{3i} \hat{S}_{3i} + \omega_{4i} \hat{S}_{4i} + \omega_{5i} \hat{S}_{5i} + \omega_{6i} \hat{S}_{6i} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 6$ 이고, \hat{T}_{1i} 는, 구동부의 속도를 \dot{q}_i 라 하면, $\hat{T}_{1i} = \dot{q}_i [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ 로 표현되며, $\overline{B_i U_i}$ 를 잇는

속박벡터(line bound vector)를 $\hat{S}_i = [s_i; s_{0i}]^T$ 라 하면,

$\hat{S}_i^T \hat{S}_j = 0$ ($j = 2, 3, \dots, 6$) 인 관계를 갖는다. 따라서,

식 (1)에 \hat{S}_i 를 곱하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{S}_i^T \hat{T} &= \hat{S}_i^T \hat{T}_{1i} \\ &= s_{iz} \dot{q}_i \equiv \dot{l}_i \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에 의해, 속도 순기구학은 식 (3)과 같이 된다.

$$\dot{l} = J^T \hat{T} \quad (3)$$

여기서, 자코비안 행렬 J 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} J &= [\hat{S}_1 \ \hat{S}_2 \ \hat{S}_3 \ \hat{S}_4 \ \hat{S}_5 \ \hat{S}_6] \\ &= \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 \\ r_1 \times s_1 & r_2 \times s_2 & r_3 \times s_3 & r_4 \times s_4 & r_5 \times s_5 & r_6 \times s_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 정역학 해석

식 (3)에 가상일의 원리(principle of virtual work)를 적용하면 식(5)와 같이 표현된다.

$$\hat{w} \cdot \delta x = \underline{\tau} \cdot \delta l \quad (5)$$

여기서, $\underline{\tau} = [\tau_1/s_{1z}, \tau_2/s_{2z}, \dots, \tau_6/s_{6z}]^T$ 이며, $\hat{w} = [f, m]^T$ 는 외부로부터 end-effector에 가해지는 웬치(wrench)이다. 식 (5)와 식 (3)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{w}^T \delta x &= \underline{\tau}^T \delta l \\ &= \underline{\tau}^T J^T \delta x \end{aligned} \quad (6)$$

윗 식에서 가상변위를 소거하면, 식(7)을 얻을 수 있고, 이는 이 기구의 정역학 관계식을 표현한다.

$$\hat{w}^T = \underline{\tau}^T J^T \quad (7)$$

2.2 기구부

힘 반향 수동조작기 기구부는 Fig. 3과 같으며, 작업영역 및 특이성(singularity) 해석[7,8]을 바탕으로 최적의 제원을 갖도록 설계되었고, 이 기구의 작업영역 해석 및 조작지수의 경향은 각각 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 한편, Table 1은 이 기구의 제원을 나타내고 있다.

작업영역의 해석결과, 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 Z 방향으로 치우치고 Y방향으로 넓게 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 4(d)).

조작성은 Fig. 5(a)와 같이, 상하판의 비율이 0.5인 경우를 정점으로 조작지수는 감소하였으며, ϕ_b 와 ϕ_p 가 커질수록 조작지수가 감소하게 된다.

위의 해석된 결과를 토대로 제작성을 고려한 설계변수가 결정되었으며, Table 1과 같다.

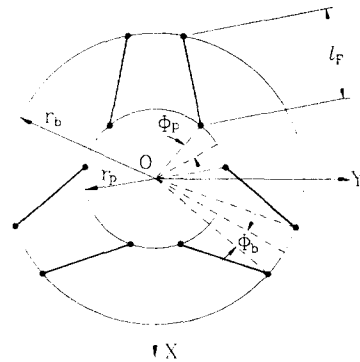


Fig. 3. Design Parameter

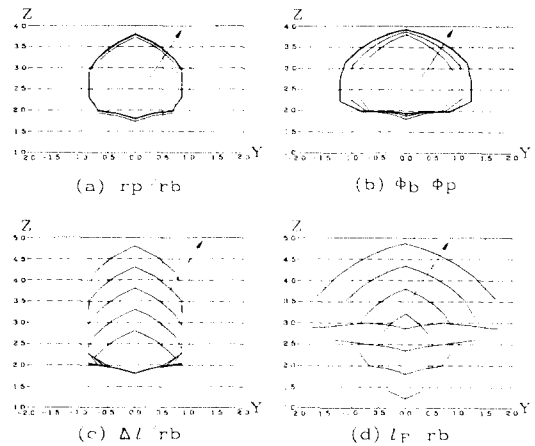


Fig. 4. Workspace Tendency for Design Parameter

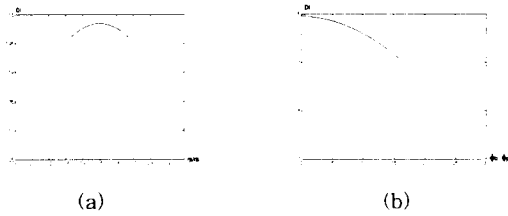


Fig. 5. Tendency of D.I

설계변수	제 원
r_p	28 mm
r_b	70 mm
ϕ_p	20 °
ϕ_b	20 °
l_F	182 mm

Table 1. Design Specification

Table 1의 제원에 따라, Fig. 6과 같이 제작되었다.



Fig. 6. Assembled Hand Controller

3. 조작기의 힘 사상과 제어 알고리즘

3.1 힘 사상

수동조작기에 의한 제어대상 로봇(slave manipulator)의 원격 제어를 위한 힘 반향의 기본개념은 다음과 같이 설정되었다. 즉, 로봇손을 6자유도를 갖는 수동조작기의 핸들에 사상시킴으로서 로봇손의 위치와 자세를 조작자가 직접 구동하는 것과 같은 느낌을 주도록 한다. 로봇손은 수동조작기의 위치와 자세를 추종하며, 작업환경과 로봇손의 상호접촉시 로봇손에 발생하는 반력을 로봇손(또는, 힘 반향 수동조작기)을 잡은 조작자가 느낄 수 있도록 힘 반향을 하도록 하였다. 또한, 수동조작기에 의해 명령된 운동방향이, 제어대상 로봇의 관절 작동 범위를 초과하는 운동일 경우, 조작자가 이를 근감각적으로 인지할 수 있도록 하기 위

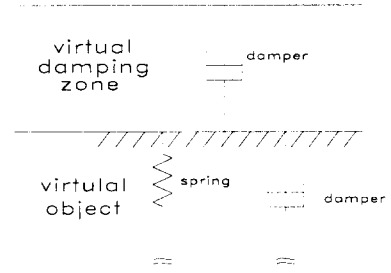


Fig. 7. Model of Force Reflecting

하여, 관절 작동 범위를 초과하는 방향으로의 조작을 억제할 수 있는 힘이 조작자에게 반향되어야 된다.

본 연구에서는 제어대상 로봇이 외부환경과 접촉할 경우와 관절 작동 범위를 초과할 경우의 힘 사상을 나선이론으로 규명하였고, 또한, 힘 반향 수동 조작기의 반응도(responsibility)를 고려한 기본적 가상표면 모델을 제시하였다.

(1) 힘 반향 모델

힘 반향 모델은(Fig. 7 참조) 다음과 같은 특성을 갖도록 하였다.

■ 가상완충지역(virtual damping zone)

로봇이 자유운동 공간에서 가상 외부환경 공간으로의 급작스런 조작시, 외부 환경과의 과도한 충격을 방지해 주기 위하여 조작자에게 외부환경의 존재를 인지시키기 위한 힘 반향 공간이며, 반향된 힘으로 인하여 충돌속도가 감쇠되도록 하였다.

■ 가상물체(virtual object)

가상표면위의 완충지역을 초과하여 조작된 로봇은 가상물체와 접촉을 하게 되며, 가상물체의 특성은 스프링으로 모델링하였다. 또한, 충돌시의 강체특성을 살리기 위하여 완충기를 설정하였으며, 이 완충기는 가상물체와의 충돌시에만 작용하도록 하였다.

■ 가상표면(virtual surface)

이는, 일정 입계치의 정적 조작힘을 조작기에 가할 때, 가상물체 모델에 의한 반력과 힘의 평형을 이루는 표면으로서 가상물체의 경계면이 된다.

이와 같이 모델링된 가상지역들의 감쇠계수와 스프링 계수는 실제 물체의 강성특성을 결정지어 주는 설계변수가 된다.

(2) 장애물과의 접촉시 로봇의 선단에 가해지는 힘

로봇손이나 작업도구가 가상환경과 상호접촉 할 경우, Fig. 8과 같이 E_c , M_c 반력이 가해지며, 이 반력은 식 (8), (9)와 같은 스프링과 완충기의 계수에 의해 결정된다.

$$E_e = \begin{cases} 0 & : z_c \in \text{가상자유공간} \\ K_{D1} \dot{z}_{err} & : z_c \in \text{가상완충지역} \\ (K_P z_{err} + K_{D2} \dot{z}_{err}) & : z_c \in \text{가상물체} \end{cases} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{cases} z_c : \text{로봇손목 기구부 위치의 } z\text{방향 성분} \\ z_{err} = z_{env} - z_c \\ K_{D1}, K_{D2} : \text{감쇠계수} \\ \text{if, } z_c < 0.0, K_{D2} = 0.0 \end{cases}$$

$$M_c = \begin{cases} 0 & : z_c \in \text{가상자유공간} \\ E_c \times r & : z_c \in \text{가상완충지역 또는 가상물체} \end{cases} \quad (9)$$

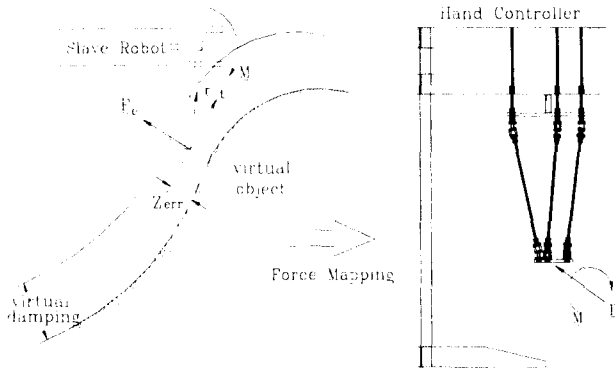


Fig. 8. Mapping Algorithm for Obstacle

수동조작기의 상판에 가해지는 토크(\widehat{W}_e)는 로봇손에서 발생하는 외력의 방향과 일치되며 식 (10)과 같다.

$$\widehat{W}_e = \begin{bmatrix} F_e \\ M_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

J_{js} 를 수동조작기의 속도변화 행렬로, τ_m^{js} 을 수동조작기의 모터에서 요구되는 토크라고 할 때, 평행기구의 정역학적인 관계식으로로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\tau_m^{js} = (J_{js})^{-1} \widehat{W}_e \quad (11)$$

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

(3) 관절 작동 범위를 초과하는 경우

제어대상 로봇 i 번째 관절이 작동 범위를 초과할 경우에는, 해당 관절에 부과되는 토오르크는, 직렬 로봇의 경우, 그 관절에 가상스프링을 설정함으로써 산출토록 하였다. 이와 같은 가상스프링에 의하여 발생하는 토오르크는 정역학 식 (12)에 의하여 로봇손에 가해지는 토크(\widehat{W}_c)와 평형을 이루게 된다.

$$\tau_c = J^T \widehat{W}_c \quad (12)$$

직렬 로봇의 속도 순기구학은 미소변위에 대하여 식 (13)으로 표현된다.

$$\widehat{q} = J \delta \theta \quad (13)$$

여기서, 식 (12)의 토오르크는 관절 형태에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_{ci} &= k \delta \theta_{ci} & : \text{회전조인트} \\ f_{ci} &= k \delta l_{ci} & : \text{선형조인트} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\delta \theta_{ci}$: 과부하에 따른 관절의 탄성변형적

가상 속박변위

τ_{ci} : 가상변위에 따른 가상 속박모멘트

k : 가상스프링 계수

식 (12)에 식 (13)을 대입하여 정리하면, 토크(\widehat{W}_c)는 식 (15)와 같다.

$$\widehat{W}_c = (J^T)^{-1} [K] \delta \theta \quad (15)$$

식 (15)로 표현된 토크에 가상일의 원리를 적용하면 식 (16)과

같이 표현된다. 여기서, \widehat{q}_i 는 자유변위를 나타낸다.

$$\text{Work} = \widehat{q}_i^T \widehat{W}_c \quad (16)$$

식 (16)에 제어 대상 로봇인 직렬기구의 속도 순기구학 식 (13)을 적용하여 정리하면 식 (17)과 같이 관절좌표계에서의 자유변위와 속박변위간의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\text{Work} = \delta \underline{q}_i [K] \delta \underline{q}_c \quad (17)$$

식 (17)의 가상일은 0이 된다. 따라서, 식 (15)로 표현되어진 토크가 힘 반향 수동조작기에 전달되어야 할 토크임을 알 수 있다.

3.2 제어 알고리즘

가상 환경에 대한 실험을 수행하기 위하여 Fig. 9와 같은 수동조작기의 제어 알고리즘을 구성하였다. 힘 사상에 의해 구한 각 다리의 힘은, PWM방식 구동모터에 폴리-와이어 전달기구를 설치하여 수동조작기의 핸들에 전달하게 된다.[9.10]

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험 방법

앞서 제시한 힘 사상 알고리즘의 기술적 실현성 검증을 위하여 실험을 수행하였다.

원격제어를 위한 일반적 모의실험 장치의 구성도는 Fig. 10과 같으며, 이러한 모의실험은 가상물체를 직접 수동조작기 작업영역에 설정함으로써 간략화 될 수 있다, 즉, z축상의 위치가 260mm인 x-y 무한평면을 앞서의 가상환경으로 모델링하여 수동조작기와 가상환경과의 상호작용을 관찰하는 것이다. 이러한 실험의 일관성을 유지하기 위해 일정 무게의 추를 수동조작기의 상판에 설치하여 수동조작기의 최저위치(211.89mm)에서 자유낙하 운동을 하게 하여 가상환경과의 충돌을 관찰하도록 하였다.

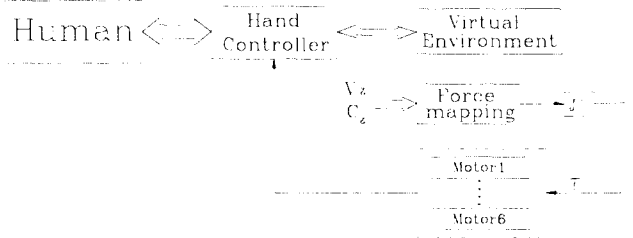


Fig. 9. Control Block Diagram

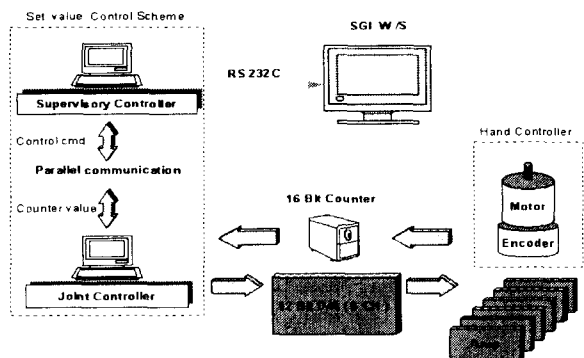
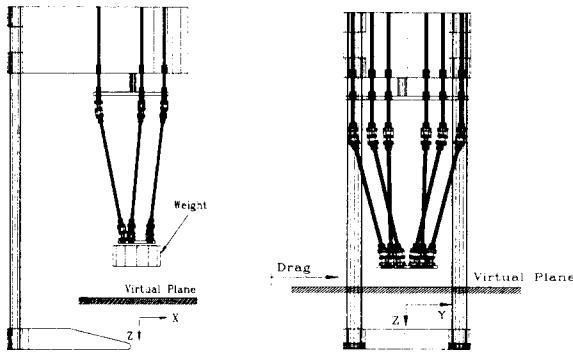


Fig. 10. Hardware Configuration



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

Fig. 11. Experimental Method

본 연구에서는, 자유낙하에 대한 응답특성을 실험하기 위하여 첫 번째 실험으로 Fig. 11(a)와 같이 실험장치를 구성하여, 560gf의 추와 800gf의 추 각각에 대하여 상관의 최저위치(211.89mm)에서 자유낙하를 시켜 가상평면(260mm)에 충돌하는 경우, 수동조작기의 상관이 정상상태에 도달하는 시간까지의 z값을 측정하여 실험하였다. 두 번째 방법으로 Fig. 11(b)와 같이 수동조작기를 조작자가 직접 조작 하였을 때, 조작자가 가상평면으로 느껴지는 z값을 측정하여 실험하였다.

4.2 결과 및 분석

Fig. 12는 560gf의 추를 감쇠+(스프링+감쇠) 모델에 자유낙하시킨 실험1의 결과를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 가상평면인 260mm 이상의 z값들은 가상평면으로의 침투를 나타낸다. Fig. 13은 800gf의 추에 대해 가상환경을 1.스프링모델, 2.스프링+감쇠 모델, 3.감쇠+(스프링+감쇠) 모델로 선정하였을 경우의 실험1에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 13의 결과에 의해 감쇠+(스프링+감쇠) 모델이 자유낙하 충돌시의 침투가 작으며, 정상상태에 도달하는 시간이 짧음을 알 수 있다. 또한, 이러한 가상환경 모델은 스프링계수와 감쇠계수가 커질 수록 실제의 강체에 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 14는 실험2에 대한 결과로서 최대 0.522mm의 가상물체로의 침투를 보여준다.

■ 실험1의 결과(free fall 실험)

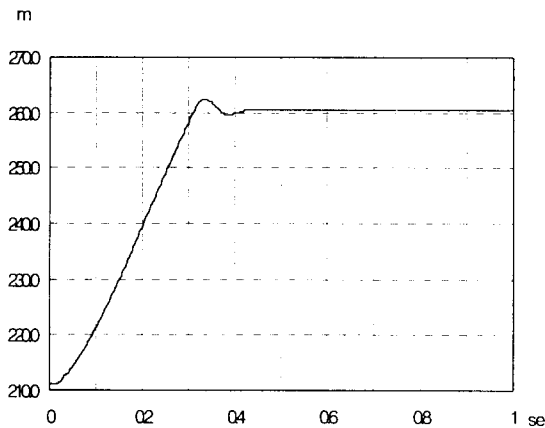


Fig. 12. 560gf Free Fall : $K_d, (K_s+K_d)$

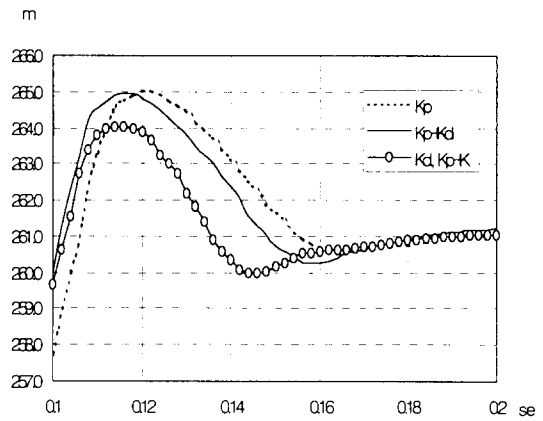


Fig. 13. 제어 알고리즘 비교분석

■ 실험2의 결과(handling 실험)

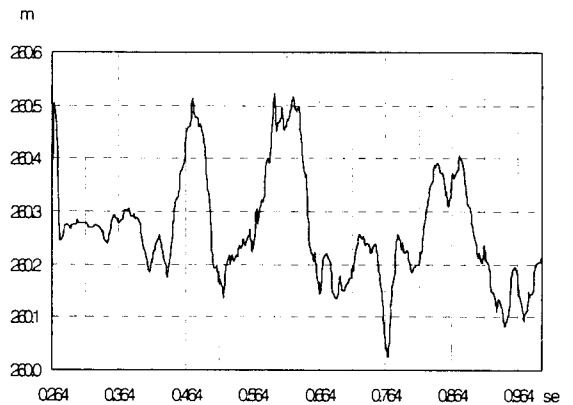


Fig. 14. Handling of Force-Reflecting Hand Controller

5. 결론

본 연구에서는, 원격제어되는 로봇시스템에 근 감각적 정보를 제공하는 힘 반향 수동조작기의 개발을 위한 힘 사상 알고리즘 및 실험에 대한 결과를 제시하였다. 가상물체는 스프링과 감쇠기로 모델링하였으며, 이와 같은 가상물체로의 접촉시 수동조작기로 전달되어야 할 힘 사상 알고리즘은 작업로봇의 정역학적 관계에 근거하였다. 또한 작업로봇의 관절 한계각을 벗어나는 명령에 대한 힘 사상 기법을 제안하였다.

참고 문헌

- [1] 허훈, 김희국, "침단 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] 김한성, "스튜어트 플랫폼의 조작성 연구", 연세대학교 석사 학위 논문, 12, 1995
- [8] 최용제, "나선이론에 의한 로봇의 운동 및 역학적 해석." 대한 기계 학회 학회지, 제31권, 제7호, pp. 616-625, 1991,
- [9] 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.
- [10] C. H. An, C. G. Atkeson, J. M. Hollerbach, "Model based control of a robot manipulator", The MIT press Cambridge, Ma, London, England. 1988
- [11] 변현희, "힘 반향 6자유도 수동조작기의 설계연구", 연세대학교 석사 학위 논문, 6, 1996