

가상 tool의 조작을 통한 simulation 환경에서의 force display에 관한 연구

이 승 룡*, 이 규 훈†, 최 혁 렬‡

* 성균관대학교 기계설계학과 대학원

† 성균관대학교 기계공학과 대학원

‡ 성균관대학교 기계공학과

ABSTRACT

This paper describes the force display system which presents feel information to the operator through manipulating a virtual tool with a master arm in the simulated environment. The movement of a tool grasped by the operator, which is modeled as a circle or a square is displayed in the graphic screen of a computer. When the tool contacts with the virtual environment, the operator is forced to feel contact and the feature of the virtual environment through torque control of the master arm. Contact situations are modeled as close as to the reality considering the friction, and multiple contacts. Several experiments are conducted and the effectiveness of the developed system is confirmed.

1. 서 론

오늘날, 컴퓨터 그래픽스 분야의 발전은 가상 환경상에서 다채로운 시각적 이미지를 표현할 수 있도록 여러 기술을 제시하고 있다. 특히, 가상 공간상에서 설정된 모델들 사이에 접촉과 충돌을 포함한 상호 작용을 표현하기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있다. Lin과 Canny는 돌출한 3차원 모델들 사이에 최근접점을 찾는 알고리즘을 제시하여 가상 환경상에서 물체사이의 상호 작용을 표현하는 효과적인 방법에 대해 연구하였다[1]. Lin등은 가상 환경상에서 여러 가지 기하적 모델들 사이에 접촉의 결정과 충돌 인식에 대한 효율적인 알고리즘을 연구하였다[2]. 이와 유사한 연구들은 많이 수행되어 왔으며 대체로 시각적 이미지의 표현에 중점을 두고 진행되어 왔다고 할 수 있다.

실제와 같은 시각적 이미지는 조작자가 자신이 조작하는 환경을 인식하는 데에 있어서 매우 효율적인 것이나 예를 들어 블록을 조립하거나 peg-in-hole 작업과 같이 상호 작용을 포함한 가상 환경에서의 작업에서는 모서리와 면 사이에 미끄럼, 충격, 굴림등과 같이 다양한 상호 운동이 존재하며 이러한 운동을 단지 시각적 이미지로만 표현한다면 조작자가 가상 환경을 인식하는 데 있어 현실과 많은 차이를 느낄 것이다. 그러므로, 힘 혹은 촉감의 감지 및 제시(display)는 가상 모델사이

어의 상호 작용을 인식하기 위한 가장 중요한 정보라 할 수 있으며 다양한 연구가 진행되어 왔다. Ouh-young등은 물질의 분자 구조를 조작할 수 있는 6-D 힘 제시 시스템을 개발하여 시각 이외에 역각의 중요성을 강조하였고[3], Iwata는 스투어트 플랫폼(Stewart platform)을 이용하여 힘을 제시할 수 있는 시스템을 개발하였다[4]. Kotoku등은 모델 환경에서 가상적인 다면체를 조작할 경우 구속력을 생성하는 방법을 제시하였으나 마찰에 관한 연구가 부족하였다[5]. 그밖에 Fisher등은 Head-Mounted Display(HMD)와 Glove-like Tactile Input Device(Data Glove)를 사용한 시스템을 제안하였고[6] Tanie 등에 의해서 3차원 모델의 형상을 4축 암(arm)을 통해 반력으로 느낄 수 있는 장치가 제시되기 까지 여러 방법과 알고리즘이 논의되어 왔다[7]. 역각 및 촉각 제시(force feel and tactile perception display)에 관한 기술은 가상 현실 시스템에 적용될 수 있을 뿐 만 아니라, 오프라인 교시 시스템(off-line teaching system), 원격 조작 시스템(teleoperation system)등에도 폭넓게 응용될 수 있다[8].

본 연구에서는, 가상 환경에서 도구를 조작할 시에 환경과의 접촉시에 생기는 힘을 조작자가 느끼도록 하는 방법을 제안하게 될 것이다. 제안된 방법을 간략히 설명하면 조작자는 그래픽 표현으로부터 시각 정보를 얻을 수 있고, 마스터 암(master arm)으로부터 실시간

(real-time)으로 접촉에 의한 반력을 느끼도록 한다. 마스터 압은 가상 환경에서 가상 도구(virtual tool)를 움직이기 위해 조작되며 도구는 마스터 압의 움직임을 감지함으로써 가상 환경에서 움직여 지고 도구와 물체 사이의 접촉은 가상 환경에서 확인 된다. 이 때 접촉이 인식되면 그 힘이 토크 컨트롤(torque control)을 거쳐 마스터 압의 관절 토크를 통하여 나타나게 되고 조작자는 힘을 느끼게 될 것이다. 이러한 힘 반영에 있어서 높은 감도는 가상 환경을 실감있게 인식하는 데 효율적일 것이다. 기존의 연구 과정은 이러한 고감도의 표현에 있어서 마찰력에 관한 고려가 충분하지 않았고 단지 모델 인식의 차원에서 시도되어왔다고 여겨진다. 높은 감도의 표현을 위해서는 마찰력의 고려는 필수적이다.

실험을 통하여는 3자유도 스카라 로봇(3-DOF SCARA ROBOT)을 마스터 압으로 사용하여 모델 공간에서 도구를 조작하고, 계산된 힘을 얻게 되는 작업을 수행하였다. 도구의 형상은 원과 정사각형으로 한정하였고 실험의 결과로부터, 조작자는 접촉의 상태를 현실적으로 느낄 수 있고, 시스템이 감지된 힘을 고감도로 표현하는 데 효과적으로 작동한다는 것을 보여지게 될 것이다.

2. 접촉 인식 알고리즘

이 논문에서 고려되는 도구는 원과 정사각형의 형태로 한정하며 벽면을 제외한 도구는 강체로 가정한다. 먼저, 접촉의 유무를 파악해야 하는 데, 이를 위하여 점과 점 사이의 근접 거리를 계산하여 접촉을 인식하도록 하였다. 접촉이 인식되면 접촉의 종류에 따라 반력을 계산할 수 있게 되며 이를 바탕으로 마스터 압의 제어를 하게 된다. 가상 환경은 2차원 모델로 가정하므로 접촉은 점과 면, 면과 면의 경우로 구분할 수 있으며 점과 면의 접촉을 기본 접촉으로 고려하며 그 밖의 복잡한 접촉 형태는 이의 조합으로 표현한다[8].

2.1 접촉의 인식

접촉 인식의 기본 개념은 다음의 식에 의해 나타내어질 수 있다.

$$d_{so} = \min |p - q|, \quad p \in S, q \in O \quad (1)$$

여기서, 그림 1 (a)에 보여진 것과 같이 d_{so} 는 물체 S

와 O 사이에 가장 짧은 유클리디언 거리(Euclidean distance)이고, p와 q는 물체 S와 O에 있는 점을 나타낸다. 즉 두 물체의 모든 점과 점 사이의 거리를 계산하여 기준 거리 이내에 들어오면 접촉으로 간주하게 되며 이때, 가장 짧은 거리를 갖는 점을 찾아서 접촉 유무를 판별하여야 한다. 원과 같은 경우는 가장 짧은 거리를 유지할 수 있는 점이 항상 하나이지만, 다각형의 경우는 변할 수 있으므로 두 물체가 상대적인 위치를 바꿀 때 마다 확인해야 한다. 이것은 매우 시간 소비적인 문제이므로 보다 효율적인 방법으로 그림 1 (b)에 보여진 것과 같이 도구의 주변에 일정한 영역을 설정하고, 이 영역 안에 다른 물체가 들어오면 그 때부터 근접점을 확인하게 하는 방법을 적용하였다.

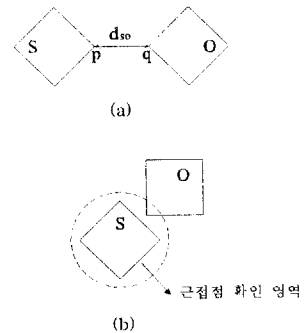


그림 1. 근접 거리 계산과 근접점 확인 영역

2.2 기본 접촉과 상호 작용력의 계산

● 면-모서리 접촉 모델

조작되는 물체가 접촉하는 벽면과 약간의 중첩이 있다고 가정한다. 즉, 벽면은 강성 K를 가진 스프링으로 가정하고 댐핑도 고려한다. 그림 2에 접촉의 경우가 나타나 있다.

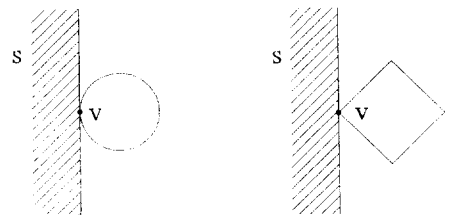


그림 2. 원과 벽면, 정사각형과 벽면이 접촉하는 경우

여기서 상호 작용력(interactive force)는 다음과 같이 설정된다.

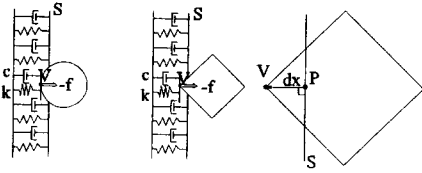


그림 3. 상호 작용력과 합입량의 설정

V는 벽면 S에 접촉되는 물체의 접촉점이고, P는 물체가 접촉한 벽면 S상에 있는 접촉점이다. dx는 P와 V를 연결한 벡터이고 가상 도구의 환경에 대한 합입량을 나타낸다. 따라서 dx의 크기는 벽면 S와 물체 V 사이의 거리이고, 방향은 벽면 S의 수직 벡터와 반대 방향이며 벽면의 스프링 효과는 dx의 방향에 따르게 된다. 그림 3과 같이 물체 V가 벽면 S상의 접촉점 P를 눌렀을 경우 상호 작용력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = K dx + C \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

2.3 기본 접촉의 조합

정사각형의 경우, 모서리의 끝점이 벽면에 접촉한 경우는 면-모서리 접촉의 경우로 해석할 수 있으나 면에 해당하는 부분이 접촉한 경우는 이와 다르다. 이와 같은 경우는 다음과 같이 기본 접촉의 조합으로 해석할 수 있다.

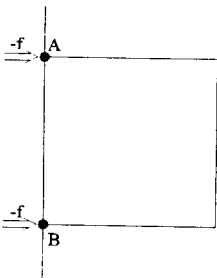


그림 4. 면에 대한 반력의 해석

그림 4에서 점 A와 점 B는 면-모서리 접촉이라고 가정하고 면과 면의 접촉은 면-모서리 접촉의 조합으로 표시할 수 있다. 또한 상호 작용력의 계산도 그림 5에서

나타낸 것과 같이 각 기본 접촉에 대한 힘의 조합으로 고려할 수 있다.

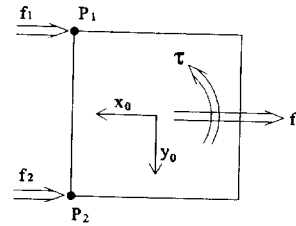


그림 5. 면 접촉일 경우 고려되는 합력과 합모멘트

따라서 면 접촉일 경우 합력과 합모멘트는 다음과 같이 계산될 수 있으며

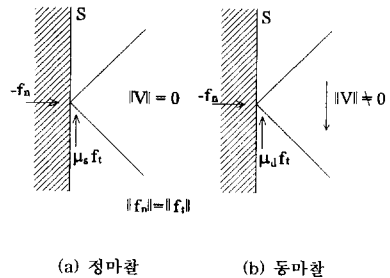
$$f = \sum_i f_i \quad (3)$$

$$\tau = \sum_i r_i \times f_i$$

여기에서 r_i 는 벽면의 수직 벡터와 같은 힘벡터에 수직인 벡터이며, n은 고려되는 외력의 수를 나타낸다.

2.4 마찰에 의한 상호 작용력

마찰의 효과는 물체가 벽면에서 미끄러짐이 일어날 때 고려된다[9]. 그림 6에 보여진 것과 같이 마찰 현상은 정마찰(static friction)과 동마찰(dynamic friction) 두 가지로 모델링할 수 있다.



(a) 정마찰 (b) 동마찰

그림 6. 마찰력과 운동 관계

그림 6에서 μ_s 는 정마찰 계수(static friction coefficient)이고 μ_d 는 동마찰 계수(dynamic friction coefficient)이며 이를 이용하면 정마찰의 경우는 아래와 같은 식으로

모델링할 수 있으며

$$\|F_y\| \leq \mu_s \|f_i\|, \quad \|V_y\| = 0 \quad (4)$$

$$\|F_y\| = \|F_y\|$$

동마찰의 경우에는 다음과 같이 마찰력이 표현된다.

$$\|F_y\| > \mu_s \|f_i\|, \quad \|V_y\| > 0 \quad (5)$$

$$\|F_y\| = \mu_d \|f_i\| + \|F_y\|$$

여기에서 F_y 는 물체를 조작하는 조작자의 y방향의 힘이고 V_y 는 물체의 y방향으로의 속도이며 f_i 는 식 (2)에서 f 를 법면과 평행한 접선 방향으로 변환한 힘이다.

3. 힘제시 시스템 (Force Display System)

앞서 제안한 접촉 인식 알고리즘과 접촉력 계산법은 힘제시 시스템에 구현되었으며, 그림 7은 힘제시 시스템의 구성이며 그림 8은 이의 하드웨어 블록 다이어그램을 보여 준다.

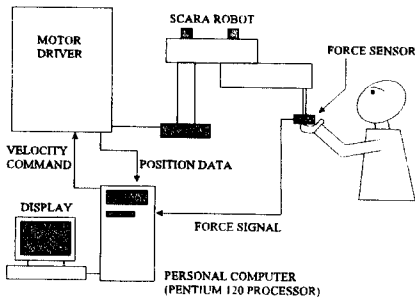


그림 7. 힘제시 시스템의 개념도

힘제시 시스템은 크게 매스터 암과 그래픽 디스플레이, 시뮬레이터로 나눌 수 있다. 그래픽 디스플레이와 시뮬레이터는 퍼스널 컴퓨터에 속하며 매스터 암으로는 3축 SCARA 로봇을 이용하였고 조작자는 6축 Force Sensor(JR3 67M25)가 장착되어 있는 손잡이를 쥐고 작동하도록 되어 있다. 작동 원리에 관하여 간단히 설명하면 조작자가 손잡이에 힘을 가하면 센서를 통해 컴퓨터에 입력된다. 이 힘은 컨트롤러를 통해 매스터 암의 토크로 작용하여 매스터 암이 동작하도록 하며 이 때 이

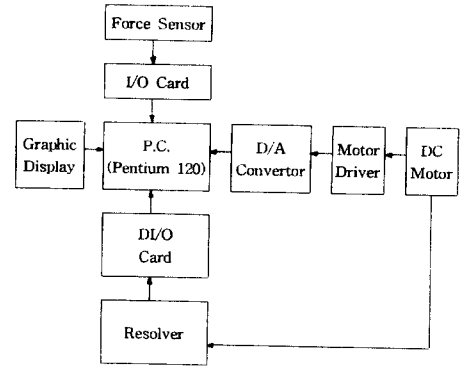


그림 8. 힘제시 시스템의 블록 다이어그램

에 대한 힘과 토크의 표현은 다음과 같다.

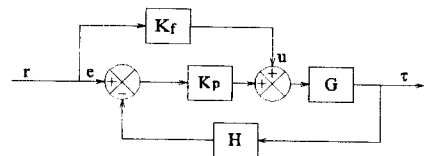
$$\tau = J^T F \quad (6)$$

$J \in R^{3 \times 3}$: 매스터 암의 자코비안

$F \in R^{3 \times 1}$: 조작자가 손잡이에 가해 주는 힘

$\tau \in R^{3 \times 1}$: 매스터 암 관절 토크

이와 같이 발생한 토크는 D/A 컨버터를 통해 모터 드라이버로 입력되고 모터를 작동시킨다. 매스터 암의 움직임은, 로봇의 움직임에 따라 컴퓨터로 입력되는 모터의 리졸버(resolver)신호를 통해 위치를 감지하여 그래픽상에 디스플레이하고, 이로 인하여 시각적 정보를 얻을 수 있다. 그래픽상에서 접촉이 인식되면 이 때 힘의 계산은 (2)~(5)식을 통해 수행되고, (6)식의 토크를 입력하여 로봇을 작동시킨다. 토크 컨트롤러는 다음의 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.



K_f : 피드포워드 게인 K_p : 비례 게인

H : 피드백 전달 함수

G : 제어 시스템 전달 함수

r : 기준 입력

그림 9. 토크 컨트롤러 블록 다이어그램

4. 실험

실험에서는 원형과 정사각형의 도구를 사용하여 접촉

작업을 할 경우 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하였다.

4.1 물체가 원형인 경우

원형의 물체는 벽면과 접촉하였을 경우, 접촉하는 점이 하나라고 가정할 수 있다. 여기에서는 위에서 언급한 접촉 알고리즘을 적용하여 실행하였으며 그림 10에 나타난 것과 같이 접촉이 없는 상태(A)에서 시작하여 접촉한 상태(B), 접촉한 후 미끄러짐이 있는 상태(C), 다시 접촉이 없는 상태(D)의 순으로 수행 하여 가면서 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하였다.

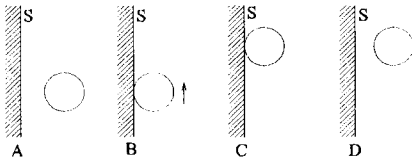


그림 10. 원형 물체의 실험 순서

4.2 물체가 정사각형인 경우

정사각형의 물체는 벽면과 접촉하였을 때, 두 가지의 경우로 나눌 수 있다. 하나는 모서리의 끝점이 벽면과 접촉하는 경우이고, 또 하나는 면이 벽면과 접촉하는 경우이다.

실험은 그림 11에 보여진 바와 같이 접촉이 없는 상태(A), 모서리로 접촉한 상태(B), 면으로 접촉한 상태(C), 미끄러짐이 있는 상태(D), 다시 접촉이 없는 상태(E) 순으로 수행 되며 이 실험은 마찰에 의한 효과보다 각이진 물체의 형상 인식에 초점을 맞추었다.

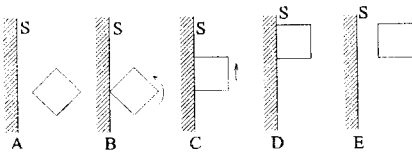
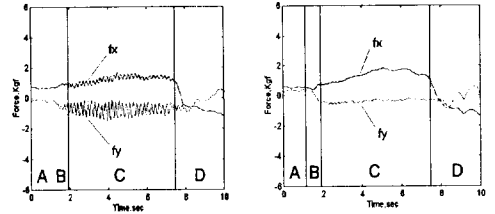


그림 11. 정사각형 물체의 실험 순서

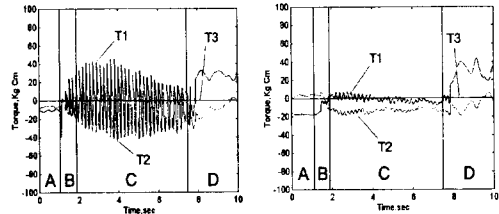
5. 실험 결과

원형 물체의 경우에 있어서 마찰이 있는 경우와 없는 경우에 관하여 얻어진 실험 결과는 그림 12, 13, 14에 나타난 것과 같다.



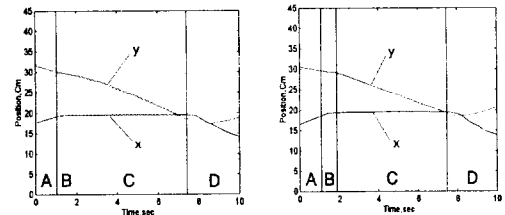
a) 마찰을 고려한 경우 b) 마찰을 고려하지 않은 경우

그림 12. x와 y방향의 힘



a) 마찰을 고려한 경우 b) 마찰을 고려하지 않은 경우

그림 13. 마스터 압의 관절 토크



a) 마찰을 고려한 경우 b) 마찰을 고려하지 않은 경우

그림 14. 위치

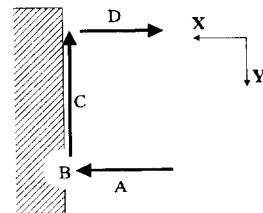


그림 15. 물체의 이동 경로

그림 10의 순서에 따라 그림 12에서 힘에 대한 선도를 보면, 물체가 벽면을 따라 미끄러지면서 정마찰과 동마찰에 의한 효과로 인해 y방향의 크기 변화가 확실하게 들어남을 알 수 있다(C구간). 실제 실험을 통해서 정마찰과 동마찰의 작용으로 인한 stick 마찰의 효과도 느낄

수 있었다. 그림 13에서 토크 선도의 경우 마찰의 상태를 쫓아가기 위해 토크가 매우 급격히 변함을 알 수 있다. 위치 선도의 경우 x의 움직임에 보면 벽면을 따라가는 형상을 볼 수 있다. 마찰을 고려한 선도에서는 미세한 위치 변화가 보여진다.

그림 14에서 A구간과 D구간은 접촉하지 않은 상태를 나타낸다. 이 구간에서는 조작자가 움직이는 데에 따라 물체가 움직인다는 것을 보여주며 B구간은 접촉이 막 일어났을 때를 나타낸다. 이 때에는 x, y방향의 위치가 고정된 상태에서 힘의 변화가 일어나기 시작함을 알 수 있다. 그림 15에 물체의 이동 경로가 나타나 있다.

정사각형 물체의 경우를 실험한 결과 모양 인식에 대한 해석은 그림 16와 같이 나타난다.

각형의 물체가 모서리로 접촉한 후 x방향의 힘에 의한 모멘트로 인해 벽면에 면접촉을 하게 되는 데 그림 16 d)를 보면 물체를 회전시키는 θ_3 가 증가함을 알 수 있다(B구간). 또한 그림 16 b)에서 x의 위치도 서서히 증가함을 알 수 있다(B구간). C의 경우는 면접촉을 한 경우로써 힘은 약간 증가한 경향을 보이고 위치나 회전은 고정되어 있는 경향을 보인다. D의 경우는 벽면을 따라 면접촉을 유지하며 미끄러지는 경우로 원형의 경우와 거의 동일하게 면을 따라 위치가 유지되고 힘과 토크가 유지됨을 알 수 있다.

6. 결 론

가상 환경에서 가상도구의 조작감 제시를 위한 방법을 제안하였다. 보다 현실감 있는 감각의 전달을 위하여 마찰을 포함한 다면체 접촉의 경우에 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하였고 실험적으로 구현함으로써 이의 타당성을 입증하였다. 실험에서는 비교적 간단한 형상에 관한 도구에 대하여 적용하였으나 일반적인 물체에도 적용이 가능할 것이다. 추후 마스터 암의 제어에 있어서 암 및 조작자의 동특성에 관한 고려가 첨가되면 보다 나은 조작감을 얻게 될 것이며 다양한 도구 및 환경에 관한 모델링 기법이 더해지면 보다 현실감 있는 가상 현실 시스템을 구성할 수 있으리라 생각된다.

참고 문헌

1. M. C. Lin and J. F. Canny, "A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1008 ~ 1014, 1991.
2. M. C. Lin, D. Manocha, and J. F. Canny, "Fast Collision Detection Between Geometric Models", Tech. report, TR 93-004, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1993.
3. M. Ouh-young, D. Beard, F. P. Brooks, and Jr., "Force display performs better than visual display in a simple 6-D docking task", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1462 ~ 1466, 1989.
4. H. Iwata, "Artificial reality with force-feedback", ACM Computer Graphics, vol.24, no.4, pp. 165 ~ 170, 1990.

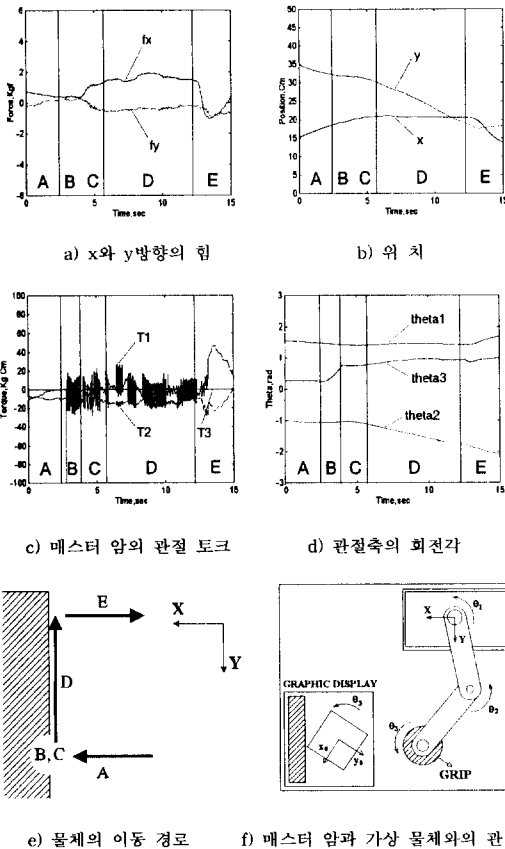


그림 16. 정사각형 물체에 관한 실험

그림 11의 순서에 따라 그림 16을 보면, A와 E구간은 원형의 물체와 마찬가지로 접촉이 없는 상태로서 조작자의 움직임에 따라 선도가 나타난다. B구간에서 정사

5. T. Kotoku, K. Tanie, and A. Fujikawa, "Environment Modeling for the interactive display (EMID) used in telerobotic systems", Proc. of IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'91), pp. 999 ~ 1004, 1991.
6. S. S. Fisher, McGreevy, J. Humphries, and W. Robinett, "Virtual Environment Display System", Compute. Graphics, 21(1) : 4-5, 1987.
7. K. Tanie and T. Kotoku, "Force Display Algorithms", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Workshop S4, pp. 60 ~ 78. 1993.
8. J. Funda and R. P. Paul, "Efficient control of a robotic system for time-delayed environment", Proc. of the Int. Conf. on Advanced Robotics, pp. 219 ~ 224, 1991.
9. T. Yoshikawa, X. Zheng, and T. Moriguchi, "Display of Operating Feel of Dynamic Virtual Objects with Frictional Surface", Proc. of the IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS'94), pp. 731 ~ 738 , 1994.
10. D. E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Int. Journal of Robotics Research , vol. 6 , No. 1, pp. 3 ~ 14, 1987.