

가상환경에서의 힘생성기법 연구

A Study of Force Generation Algorithm Based on Virtual Environments

°김창희, 황석용, 김승호

한국원자력연구소 원자력로봇 Lab(Tel: (042)868-2930; Fax:(042)868-8833;E-mail:chkim3@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract A human operator is able to perform some tasks smoothly with force feedback for the teleoperation or a virtual device in a the virtual environments. This paper describes a virtual force generation method with which operator can feel the interactive force between virtual robot and artificial environments. A virtual force generation algorithm is applied to generate the contact force at the arbitrary point of virtual robot, and the virtual force is displayed to the human operator via a tendon master arm consisted with 3 motors. Some experiments has been carried out to verify the effectiveness of the force generation algorithm and usefulness of the developed backdrivable master arm.

Keywords Virtual environments, Kinesthetic feedback, Telerobot, Force generation, Master arm

1. 서론

원격로봇을 사용하여 작업을 수행하는 조작자는 작업현장과 떨어진 안전한 곳에 위치하여 로봇의 작업상황을 감시하고 예기치 못한 사태가 발생시에는 이에 대처하여 수동으로 작업을 수행할 수 있어야 한다.

그러나 원격작업은 제한된 작업공간 내에서 작업을 수행하여야 하므로 작업시 주변 물체와 충돌할 수도 있다. 이와 같은 충돌을 작업자가 감지하여 대처하기 위해서는 원격로봇에 힘센서를 부착하여야 하고 센서데이터 처리를 위하여 많은 하드웨어와 소프트웨어가 추가되어야 한다. 이러한 문제점들은 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 더불어 가상현실 기법이 발달함에 따라 가상현실 기법을 활용하여 해결할 수 있다.

가상현실 기법은 초기에는 항공, 우주 분야에서 개발이 시작되어 NASA의 Ames Research Center에서는 가상환경을 이용한 실제 원격로봇의 제어 및 데이터의 처리에 관한 연구를 수행하였으며, Wright-Patterson Air Force Base Aerospace Medical Research Laboratory에서는 실시간으로 조종사에게 필요한 가상영상정보를 제공하기 위한 연구를 수행하였다. 최근에는 그 활용 범위가 광범위하게 확대되고 있으며 원자력시설, 심해, 극지와 같은 극한환경에서의 원격작업 분야 및 외과수술 훈련 및 관절촬영 내시경검사 훈련시뮬레이터 등의 분야에서 연구가 활발하게 진행되고 있다[2][3][4].

가상현실은 인간의 감각특성을 심분 활용하여 현장감, 현실감을 구현하는 기술이다. 특히 인간은 시각뿐만 아니라 물체와의 접촉시에 받는 운동감각(kinesthetic feedback)을 통하여 물체를 인식하게 된다. 따라서 가상환경 내에서 사용자가 현실감을 느끼기 위해서는 시각적 현실감 뿐만 아니라 사용자가 접촉을 통하여 느낄수 있는 운동감각도 충실히 구현할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 운동감각 구현을 위하여 가상로봇이 물체와 충돌하였을때 발생하는 힘을 감지할 수 있는 가상힘생성 기법을 제안하였으며, 개발된 기법을 원격로봇 시스템에 적용하기 위하여 3 자유도의 매스터 암(Master Arm)을 사용하여 그 효율성을 검증하였다.

2. 시스템 구성

본 연구의 최종 목표는 가상환경을 이용하여 원격로봇의 작업자를 훈련시키고 실제 로봇을 제어할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 이상적으로 개발이 완료되면 사용자는 실제 작업에 앞서 가상환경내에서 수행할 작업내용을 훈련할 수 있으며, 또한 작업자는 가상로봇을 통하여 작업을 수행하고 실제 로봇은 가상로봇의 동작을 따라하도록 하므로써 로봇의 작업상황을 예측하면서 작업을 수행하게 된다. 가상환경을 통하여 원격작업을 수행하기 위해서는 시각 효과 못지않게 물체와의 운동감각을 사용자에게 제공하는 것도 매우 중요하다. 가상환경을 통하여 사용자에게 운동감각을 제공하기 위하여 그림 1과 같이 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템은 3 자유도를 가진 매스터 암을 사용하여 작업명령을 가상로봇에게 전달하고 가상로봇이 물체와의 접촉에서 발생된 힘을 사용자가 느낄 수 있도록 하였으며, 가상 힘을 실제화하기 위한 제어기는 PC 기반 다축 제어용 보드를 사용하였다.

사용된 주조작기는 그림 2와 같이 3 자유도의 메카니즘으로 구성되었다. 주조작기의 역구동성을 높이기 위하여 고강성 케이블을 사용하여 모터의 토크를 각 관절로 전달하도록 하였으며 주조작기가 소형인 이유로 각 액츄에이터와 관절 사이의 거리가 짧아 2 단으로 16 배 감속시켰다. 각 관절을 구동하는 액츄에이터는 소형 직류서보모터를 사용하고 각 서보모터는 광학식 위치센서가 부착되어 각 관절의 회전각이 검출된다.

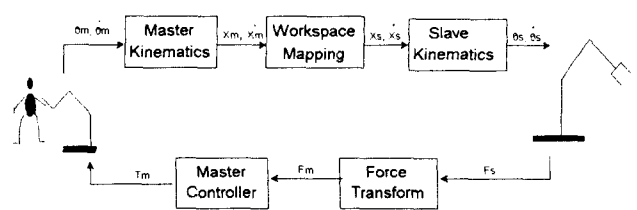


그림 1 시스템의 구성
Fig. 1 Configuration of system

그림 3은 주조작기의 관절좌표계를 보여준다. 링크 파라미터를 그림 3과 같이 설정하였을때의 정기구학 해는 식(1)로 표현된다



그림 2 주조작기
Fig. 2 Master arm

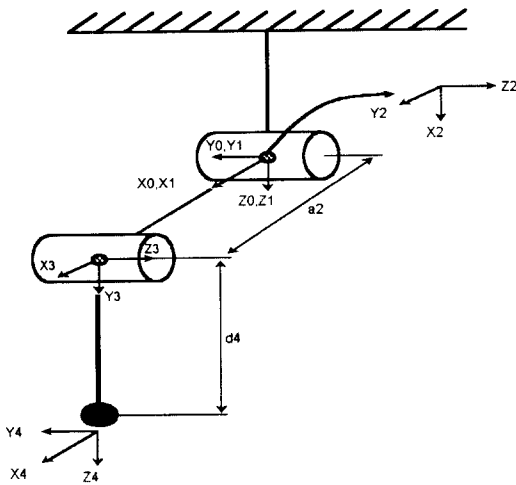


그림 3 주조작기 좌표계 설정
Fig. 3 Coordinate assignment of the master arm

표 1 주조작기 기구학 제원

Table 1 Kinematic Parameter of the master arm

i	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	-90°	0	d_4	0

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \end{bmatrix}$$

여기에서

$$r_{11} = c_1c_{23}, \quad r_{21} = s_1c_{23}, \quad r_{31} = s_{23}$$

$$r_{12} = -s_1, \quad r_{22} = c_1, \quad r_{32} = 0$$

$$r_{13} = -c_1s_{23}, \quad r_{23} = -s_1s_{23}, \quad r_{33} = c_{23}$$

$$p_x = -a_2c_1c_2 - d_4c_1s_{23}$$

$$p_y = a_2s_1c_2 - d_4s_1s_{23}$$

$$p_z = d_4c_{23}$$

이다.

생성된 가상 힘을 주조작기의 관절토크로 변환시키기 위한 자코비안 행렬은 식 (2)로 표현된다.

$$a = \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix}$$

$${}^0J_3 = \begin{bmatrix} s_1s_2a_2 & -a_2c_1c_2 & 0 \\ -c_1s_2a_2 & -s_1a_2c_2 & 0 \\ 0 & -s_2a_2 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 \\ 0 & -c_1 & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

매스터 암에 부착된 위치센서로부터 각 관절의 회전각을 검출하고 각 관절의 모터에 토크를 발생시켜 작업자가 운동감각을 느낄수 있게 하는 제어기는 고속의 DSP를 채택하고 있어 계산 및 데이터 처리 능력이 우수한 DSP-series Motion Controller를 사용하여 구성하였다. 이 다축 제어기는 동시에 8축을 제어할 수 있으며, DSP, memory, 16bit DA 변환기, 12bit AD 변환기, 카운터/타이머(8254), I/O 제어기(8255)로 구성된다. 각 관절의 DC 모터를 구동하기 위한 서보 앰프는 PWM 서보 앰프를 토크 제어 모드로 설정하여 사용하였다.

3. 가상 힘 생성

가상로봇이 작업물이나 벽에 부딪혔을 때 발생하는 힘을 얻기 위해서는 가상물체에 대한 모델링이 필요하다. 가상 벽은 그림 4에서 보여 주는 바와 같이 단단한 스프링, 댐퍼가 병렬로 존재하는 형태로 모델링될 수 있다. 가상벽 바깥은 낮은 임피던스를 갖고 가상로봇을 자유롭게 움직일 수 있지만 내부는 극히 높은 임피던스로 움직임이 제한된다. 가상벽에 물체가 부딪혔을 때 발생하는 반력은 식(3)과 같이 표현된다.

$$F = \xi(F_1 + F_2) \quad (3)$$

여기에서

$$F_1 = K(x_k - x_{wall})$$

$$F_2 = Bv_k$$

$$\xi = \begin{cases} 0 & (x_k < x_{wall}) \\ 1 & (x_k \geq x_{wall}) \end{cases}$$

- (1) 이며, x_{wall} 는 고정된 작업물의 위치($F=0$ 일때의 평형위치)이고, x_k 는 로봇 종단(end effector)의 현재 위치(접촉 후의 새로운 평형위치)이다. K 는 작업물의 스프링 상수(강성)이며 B 는 댐핑 상수이다. 그러나 일반적으로 단단한 작업물과 접촉하는 경우에는 댐핑항이 상대적으로 작으므로 스프링 상수만 존재하는 경우로 가정할 수 있어 식(4)로 간략화 시킬수 있다.

$$F = \xi(F_1) \quad (4)$$

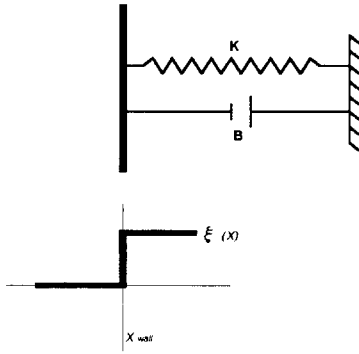


그림 4. 가상 벽의 모델링
Fig. 4 Modeling of virtual wall

일반적으로 힘반향 마스터/슬레이브 로봇의 경우 힘센서를 슬레이브 로봇의 손목 부위에 부착하여 외부 힘을 센싱하도록 되어 있다. 그러나 좁은 작업 공간에서 고난도의 작업을 수행할 경우에는 슬레이브 로봇 끝단이 아닌 다른 부위가 주변 물체와 부딪칠 수가 있으며 수행 작업에 따라서는 주변물체와 닿는 상태에서 작업을 수행할 필요가 있다. 이와 같은 경우에 로봇 종단에 위치한 센서가 감지하는 힘은 0 이지만 로봇은 충돌 부위로부터 힘을 받게 된다. 이러한 경우에 충돌이 예상되는 부위에 힘센서를 부착하려면 부착방법도 용이하지가 않으며 이에 따른 배선처리도 용이하지 않아 현실적으로 불가능하다.

가상환경 내에 존재하는 모든 물체는 수학적 모델링이 되어 있기 때문에 로봇의 각 부위와 주변물체와의 거리를 알 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하여 본 연구에서는 가상로봇의 임의의 부위가 물체가 반했을 때 받는 힘을 직접 사용자가 느낄수 있도록 하였다. 이와 같이 작업자가 슬레이브 로봇이 받는 힘 대신에 가상로봇이 주변 물체로부터 받는 가상힘을 감지토록 하면 부수적인 하드웨어가 필요없이 슬레이브 로봇이 받는 힘을 느낄수 있다.

로봇 링크 i 가 주변물체와의 충돌하였을 때 받는 힘은 식(5)과 같이 로봇 종단이 외부로부터 받은 힘이 전파된 값과 링크 i 에 직접 가해진 힘의 합으로 표현될 수 있다.

$$F_i = F_{ext} + F_{ip} \quad (5)$$

여기에서 F_{ip} 는 로봇 종단이 외부로부터 받은 힘이 i 번째 링크에 전파된 힘이고 F_{ext} 는 외부로부터 i 번째 링크에 직접 인가된 힘이다. 로봇종단이 받은 힘은 식(6)에 의하여 i 번째 링크까지 전파된다.

$$F_{ip} = {}^iR_{i+1} {}^{i+1}F_{i+1} \quad (6)$$

여기에서 ${}^iR_{i+1}$ 은 i 번째 링크좌표계를 기준으로 한 $i+1$ 번째 링크좌표계의 방위 행렬이고 ${}^{i+1}F_{i+1}$ 은 $i+1$ 번째 링크가 받는 힘이다.

가상로봇의 임의의 위치에서 받는 힘에 대응하는 운동감각을 사용자가 적절하게 느끼기 위해서는 생성된 운동감각을 표현하는 기준좌표계를 적절하게 선정하여야 한다. 즉 사용자의 시선은 시각장치를 향하고 있으므로 운동감각은 시각장치 좌표계를 기준으로 하여 표현하여야 한다. 본 논문에서는 가상로봇의 임의의 부위에서 생성된 힘을 마스터 암 베이스좌표계를 기준으로 하여 표현하였다.

4. 실험 및 고찰

가상로봇이 외부와 접촉하였을 때 사용자에게 운동감각을 느낄수 있도록 개안된 가상 힘 생성 알고리즘을 한국원자력연구소의 노즐덱 장탈작 로봇(ADAM)에 적용하여 타당성을 검토하였다. 그림 5는 ADAM의 그래픽 모델을 나타내고 표 2은 기구학 제원을 보여준다. 주조작기가 3 자유도의 위치만을 표현할 수 있으므로 ADAM의 방위(orientation) 부분은 고정하였다.

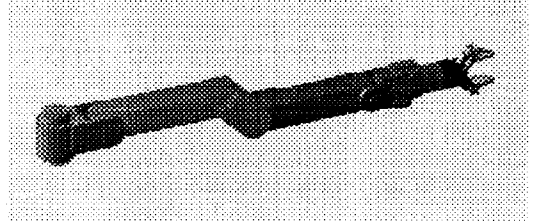


그림 5 원격로봇(ADAM)의 그래픽 모델
Fig. 5 Graphical model of telerobot(ADAM)

표 2 ADAM의 기구학 제원
Table 2 Kinematic Parameter of ADAM

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	100 mm	θ_1
2	90 °	280 mm	0	$\theta_2 - 9.5$ °
3	0	690 mm	0	$\theta_3 + 9.5$ °
4	0	480 mm	0	θ_4
5	-90 °	135 mm	0	$\theta_5 - 90$ °
6	-90 °	0	0	θ_6

가상로봇은 매스터 암의 움직임을 추종하면서 작업을 수행한다. 이 때 가상로봇의 작업 영역과 매스터 암의 작업 영역은 기구학적 형태를 달리하면 서로 일치하지 않는다. 매스터암과 가상로봇의 작업 영역의 형상과 크기가 다름으로 인해 매스터 암의 작업영역은 가상로봇의 작업영역에 모두 대응될 수 없으며 작업 불가능한 영역이 발생하게 된다. 따라서 이러한 매스터 암의 작업영역은 가상로봇의 작업영역을 최대한 확보할 수 있도록 사상되어야 한다.

슬레이브 로봇의 작업가능 영역을 왜곡없이 최대한 확보하기 위하여 원격로봇의 작업영역은 식(7)과 같이 매스터 암 축의 작업 영역을 x, y, z 축에 대해 각각 일정 비율로 확대, 또는 축소하여 구해진 작업영역으로 사상하도록 하였다.

$$\begin{bmatrix} x_{sdl} \\ y_{sdl} \\ z_{sdl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 x_m, y_m, z_m 은 매스터 암 끝단의 위치를 나타내며 비례상수 a, b, c 는 가상로봇의 작업영역과 매스터 암의 작업영역 크기의 비율을 나타낸다. 또한 $x_{sdl}, y_{sdl}, z_{sdl}$ 은 가상로봇 종단의 위치를 나타낸다. 본 논문에서는 매스터 암과 ADAM의 작업공간의 크기 비율 5.7로 a, b, c 값을 결정하였다.

가상로봇 종단이 가상벽에 부딪혔을 경우, 팔굽부위가 벽에 부딪혔을 경우, 끝단과 팔굽이 동시에 부딪혔을 경우에 대하여 팔목부위에서 받는 운동감각을 측정하기 위한 실험을 수행하였

다. $z = -60$ cm(A 평면), 60 cm(B 평면) 에 가상벽이 위치하도록 하였으며 가상벽의 스프링 상수는 3.7으로 설정하였다. 충돌이 없을 때 구조작기에 인가되는 토크는 0이 되도록 하여 가상로봇이 낮은 임피던스를 갖고 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다.

힘 반사이득 K_f 는 가상로봇이 받는 힘을 어느 정도의 감도(sensitivity)로 구조작기의 구동기에 반력으로 작용시켜 사용자에게 운동감각을 느끼도록 하는 가를 결정하는 값이다. 마스터 암 동작 특성은 작업자가 마스터 암을 세게 잡으나, 느슨하게 잡느냐에 따라 크게 변화한다. 너무 작은 이득은 운동감각의 피드백 양이 미미하여 작업자가 운동감각을 충분히 느낄 수 없다. 반면에 너무 큰 이득은 시스템의 안정 마진을 줄여서 시스템을 불안정하게 만들 수 있다. 그러므로 힘반사 이득은 시스템의 안정성을 보장하는 범위에서 큰 값으로 설정되어야 한다. 본 논문에서는 시스템의 안전성을 보장하는 최대 힘반사 이득을 실험적으로 결정하였다.

그림 6은 힘반향 실험을 위하여 생성한 마스터 암의 위치제적을 보여준다. 실선은 힘마스터 암 끝단위 제적을 나타내고 점선은 제 2 링크의 제적을 보여 준다. 마스터 암 공간좌표상에서 ± 10 cm 공간 양 경계면을 가상벽으로 가정하였다. 그림 6의 ㉠ 부분은 제 2 링크가 벽에 닿았을 때이고 ㉡ 부분은 마스터 암 끝단이 아래쪽 벽에 닿았을 때이며 ㉢ 부분은 양쪽 모두 닿았을 때이다. 그림 7은 마스터 암이 그림 6과 같은 제적으로 움직였을 때 발생한 제 2관절과 제 3 관절에 인가된 토크 값을 보여준다. 그림 7에서 보여주는 바와 같이 로봇 종단은 접촉하지 않은 상태에서 제 2 링크가 벽에 부딪혔을때에도 운동감각을 느낄수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

가상로봇이 가상환경 내의 주변 물체와의 접촉에 의해서 받는 힘을 사용자가 운동감각적으로 느낄수 있도록 가상 힘 생성 알고리즘을 제안하였으며 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 3 자유도를 갖는 마스터 암을 사용하여 전체 시스템을 구성하였다.

실험결과 가상로봇이 주변 물체와의 충돌로 인하여 받는 힘을 사용자가 현실감 있게 감지할 수 있었으며, 가상로봇의 임의의 위치에 대한 운동감각도 느낄수 있어 제안된 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

개안된 알고리즘은 원격로봇을 사용하여 고난도의 작업을 수행하여야 하는 작업자를 훈련시키기 위한 모의훈련 시뮬레이터에 활용될 수 있으며, 또한 원격로봇의 관리제어에 활용하여 원격작업의 효율을 향상시킬 수 있다.

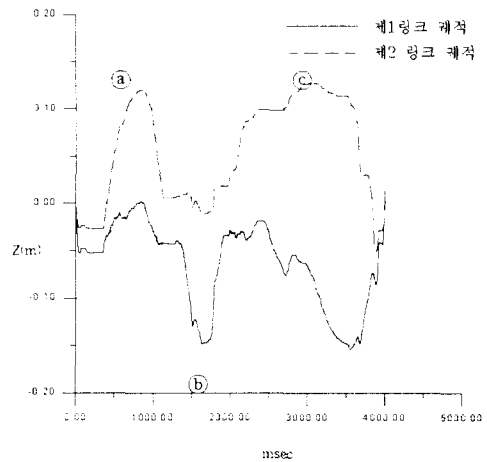


그림 6. 마스터 암의 위치제적

Fig. 6 Trajectory of master arm

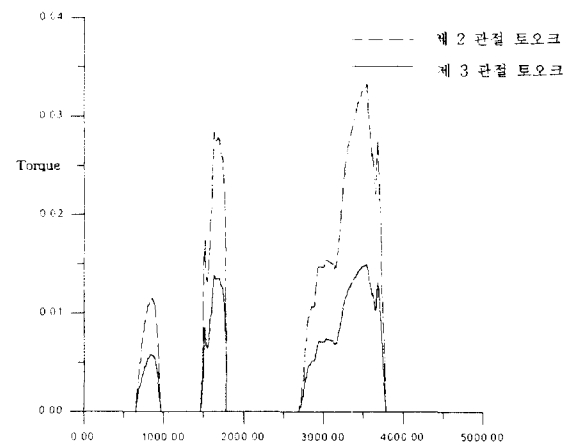


그림 7. 마스터 암의 관절토크

Fig. 7 Joint torque of master arm

참고문헌

- [1] Roy S. Kalawsky, *The science of virtual reality and virtual environments*, Addison-Wesley Pub., 1993
- [2] Thomas B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press, 1992
- [3] Nadine E. Miner, Sharon A. Stansfield, "An Interactive Virtual Reality Simulation System for Robot Control and Operator Training," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1428-1434, April, 1994
- [4] Anu Rastogi et. al, "Virtual Telerobotic Control," *DND Workshop Advanced Technologies in Knowledge Based System and Robotics*, Ottawa, Nov. 1993
- [5] J.Michael Brown, J. Edward Colgate, "Physics-based Approach to Haptic Display," *ISMRC*, 1994
- [6] R.E. Ellis, O.M. Ismaeil, .G. Lipsett, "Design and Evaluation of a High Performance Haptic Interface," *Robotica*, vol 4, pp. 321-327