

충돌감지 알고리즘을 적용한 햅틱 핸드 컨트롤러의 제어

손원선* (고려대학교 대학원 메카트로닉스학과), 조경래 (동서울대학 기계공학부),
송재복 (고려대학교 기계공학과)

Control of Haptic Hand Controller Using Collision Detection Algorithm

S. W. Sohn (Dept. of Mechatronics, Korea Univ.), K.R.Cho (Dept. of Mechanical Eng., Dong Seoul College),
J.-B. Song (Dept. of Mechanical Eng., Korea Univ.)

ABSTRACT

A haptic device operated by the user's hand can receive information on position and orientation of the hand and display force and moment generated in the virtual environment to the hand. For realistic haptic display, the detailed information on collision between objects is necessary. In the past, the point-based graphic environment has been used in which the end effector of a haptic device was represented as a point and the interaction of this point with the virtual environment was investigated. In this paper, the shape-based graphic environment is proposed in which the interaction of the shape with the environment is considered to analyze collision or contact more accurately. To this end, the so-called Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK) algorithm is adopted to compute collision points and collision instants between two shapes in the 3-D space. The 5-DOF haptic hand controller is used with the GJK algorithm to demonstrate a peg-in-hole operation in the virtual environment in conjunction with a haptic device. It is shown from various experiments that the shape-based representation with the GJK algorithm can provide more realistic haptic display for peg-in-hole operations.

Key Words : Collision detection(충돌감지), shape-based representation (형상기반 표현), Haptic hand controller

1. 서론

최근 컴퓨터 및 그래픽 분야의 비약적인 발전과 함께 이러한 기술들이 통합된 가상현실이 각광을 받고 있다. 가상현실이란 사용자의 감각을 인위적으로 자극하여 실제 세계를 경험하는 듯한 현실감을 제공해 주는 환경을 말한다.¹ 그러나 지금까지의 대부분의 가상현실은 시각 정보를 사용자에게 제공해 주는 방식이었지만, 보다 현실감 있는 가상현실을 제공하기 위하여 시각 정보 외에 이를 기초로 한 가상물체의 힘 정보를 같이 제공함으로써 사용자에게 보다 나은 몰입감과 현실감을 제공해 준다. 이러한 힘 반영은 햅틱장치(haptic device)에 의해서 수행된다.

이를 위한 일반적인 제어흐름은 다음과 같다. 사용자의 움직임을 햅틱장치를 통해 추적하여, 가상현실상에서의 움직임에 의해 발생하는 가상물체와의 충돌감지를 하고, 이에 의해 제시된 충돌반응을 햅틱장치의 임피던스로 전파하여 전달하는 것이다. 즉 얼마나 빠르고 정확한 충돌감지가 가능한지에 따라 사용자가 체험하는 충돌반응의 사실감 정도가

차이가 난다.

이에 본 논문에서는 가상현실 구현에 있어서 기존의 가상물체의 점 기반의 충돌감지 벗어나 형상기반의 충돌감지와 충돌반응 처리 방법을 제시하고자 한다. 이를 통해 사용자는 사실감 있는 물체 형성감의 직관적으로 제공 받음으로써 가상현실의 현실감을 극대화 할 수 있으며, 기존의 점 기반의 충돌감지로는 처리가 쉽지 않은 가상조립 또는 의료용 시뮬레이션등 툴 기반의 다양한 적용사례에 쉽게 활용할 수 있다. 이를 위해 두 물체 사이의 최소거리 계산을 Minkowski difference 방식을 이용하여 수행 시간이 빠르면서도 정확한 GJK 알고리즘²을 구현하였으며, 고려대학교의 지능 메카트로닉스 연구실에서 개발한 5자유도 햅틱 핸드 컨트롤러(Korea Univ.-Haptic Hand Controller)를 실험을 위해 필요한 햅틱장치로 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 GJK 알고리즘을 이용한 충돌 감지 및 충돌 반응에 대하여 설명하고, 3장에서는 HHC의 구조와 통합 환경에 대해 간단하게 소개한다. 4장에서는 핵인홀(peg-in-hole) 실험을 통해 형상구속에 의한 형성감 제시와

충돌 반응에 의한 순운동에 대해서 설명한다. 마지막으로 5장에서 결론을 도출하도록 한다.

2. 충돌 감지 및 충돌 반응

2.1 충돌 감지

가상환경상의 물체들간의 충돌을 감지하고 이들 물체들이 물리적인 법칙에 근거하여 충돌에 적절히 반응할 수 있도록 하는 작업은 가상환경의 구현에 있어서 매우 중요하다. 이를 위해 두 물체 사이의 거리를 정확하고 빠르게 계산해 내는 충돌 감지 알고리즘에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

3차원 공간에서 물체 사이의 최소거리 계산을 위한 알고리즘에서는, 면과 면 사이에서 최소거리에 해당하는 점을 찾고, 이 면들의 조합 중에서 가장 작은 최소거리를 이루는 조합을 구한다. 그러나 이 방법은 복잡한 형상을 가진 물체에 대해서는 최소거리 계산에서 고려하여야 할 면의 수가 많아져서 긴 계산 시간이 필요하다는 단점을 가진다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 최소화하기 위하여 계산 시간이 물체를 구성하는 꼭지점의 수에 비례하여 예측 가능한 GJK 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 기본적으로 두 물체의 각 꼭지점 값의 차를 이용하여 새로운 점의 집합으로 표현해 주는 Minkowski difference를 이용한다. 만일 여기서 점의 집합이 원점을 포함하면 Fig. 1(a)와 같이 두 물체는 충돌하여 교차한 것으로 간주하고, 원점을 포함하고 있지 않으면 Fig. 1(b)와 같이 두 물체 사이의 최소거리를 점의 집합으로 형성된 물체와 원점 사이의 최소거리로 정의할 수 있다.

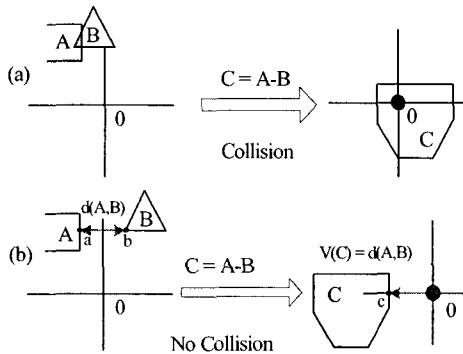


Fig. 1 Minkowski difference; (a) Collision, and (b) No collision

Minkowski difference를 이용하면 두 물체의 충돌 여부를 판별할 수 있지만, 적절한 충돌 반응을 해석하기 위해서는 두 물체의 충돌 시점과 충돌 위치에 대한 정보도 필요하다. 이를 위해 GJK 알고리즘은 두 물체 사이의 최소거리와 이를 구성하는 점의

쌍을 반복적으로 측정하여 그 거리가 0이 되는 시점을 충돌 시점으로, 이 때의 점의 쌍을 충돌 지점으로 정의한다.

2.2 두 물체 사이의 최소거리 계산

GJK 알고리즘이 제시한 두 물체 사이의 최소거리는 앞 절에서 설명한 Fig. 1(b)와 같이 Minkowski difference에 의해 형성된 물체와 원점 사이의 최소거리와 일치한다. 즉, 면과 면의 조합에서 점과 면의 조합에 의한 최소거리 계산으로 단순화되는 장점이 있다.

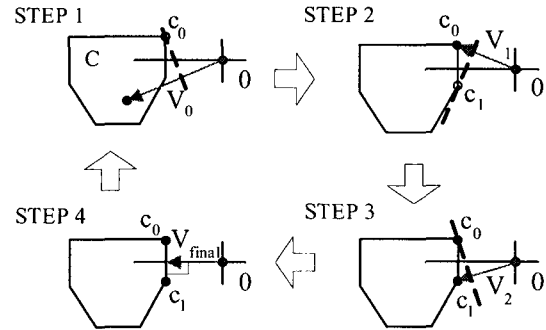


Fig. 2 Four iterations based on the GJK algorithm for computation of minimum distance

Fig. 2는 이차원 형상을 가진 물체 C에 대해서 원점에서부터의 최소거리를 계산하는 방법을 각 단계별로 도시한 것이다.

단계 1: 물체 내부의 임의의 점을 선정한다. 원점과 임의의 점을 잇는 기준벡터(support vector) V_0 와 물체 C의 각 꼭지점과의 내적을 구하여 최대인 점을 C_0 으로 선택한다.

단계 2: 원점과 단계 1에서 선택한 C_0 을 잇는 기준벡터 V_1 와 물체 C의 각 꼭지점과의 내적을 구하여 최대인 점을 C_1 으로 선택한다.

단계 3: 원점과 C_1 을 잇는 기준벡터 V_2 와 물체 C의 각 꼭지점과의 내적을 구하여 최대인 점을 찾는다. 만일 이전에 구한 점과 동일하다면 단계 4로 넘어간다.

단계 4: 1, 2, 3 단계를 반복하면 최소 거리에 해당하는 점이 속한 모서리를 구성하는 꼭지점 C_i 을 구할 수 있고, 식 (1)과 같이 C_i 벡터의 선형 조합으로 V_{final} 을 구할 수 있다.

$$V_i = \sum_{k=1}^m \lambda_k C_k \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \lambda_k > 0, \sum_{k=1}^m \lambda_k = 1 \quad (2)$$

식 (1)에서 $m = 1$ 이면 점, $m = 2$ 이면 모서리, $m = 3$ 이

면을 나타낸다.

2.3 충돌 반응

두 물체 사이의 최소거리가 처음 0이 되는 순간은 실제로 물체가 파고든 순간이다. 이 순간에 바로 전 단계의 위치로 물체를 역 이동하여 최소거리가 0이 되는 순간까지 변위를 파고든 깊이를 계산한다. 이 때의 변위에 물체의 강성 K 를 곱하면 근사적으로 물체의 변형에 의한 반력을 계산할 수 있다. 또한, 기준 좌표계에서의 위치 벡터와의 외적을 통해 모멘트도 결정할 수 있다.

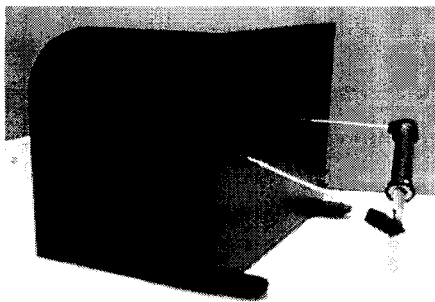


Fig. 3 Photo of KU-HHC

3. KU-HHC의 소개

Fig. 3의 KU-HHC는 사용자의 손의 위치/자세 측정하여 가상환경에 전달하고, 가상환경에서 발생한 힘과 토크 정보를 액추에이터의 제어를 통해서 사용자에게 전달해 주는 역할을 수행하는 햅틱장치이다. 이 장치의 특징은 5절 링크와 짐벌 기구를 이용하여 3자유도 기구부 2개를 병렬로 연결하여 5자유도를 구현하며, 액추에이터를 고정된 베이스에 장착하여 장치의 관성을 감소시키고, 역구동성을 증가시켰다는 점이다. 또한, 사용자가 벽에 대한 접촉한다는 느낌과 사용자에게 임의의 좌표에서 구속된 느낌을 줄 수 있도록 최대 40N의 힘 제시가 가능하도록 설계되었다⁵.

4. 펙인홀 실험

4.1 형상구속 실험

GJK 알고리즘을 이용한 충돌감지와 충돌반응에 따른 햅틱 핸드 컨트롤러(HHC)의 성능을 확인하기 위해 부품 조립의 기본이 되는 펙인홀(peg-in-hole) 작업을 수행하였다. 이를 위해 홀은 한 위치에 고정시키고, 펙은 x, y 방향의 병진과 z 방향의 회전이 가능한 3자유도 운동으로 정의하였다. 또한, HHC의 5자유도 중 본 작업에 필요한 3자유도를 이용하여 이들의 운동과 일치화시켰다. 이와 같은 조건으

로 사용자가 사실감 있는 펙인홀 잡업을 수행하기 위해서는 두 물체의 형상에 따른 자유도 구속을 사용자에게 정확히 제시해 주어야 한다. 본 실험에서는 충돌감지에 의한 형상기반 방식을 사용하여 펙을 홀에 삽입하는 과정에서 발생하는 홀의 형상 구속을 펙의 중심축에 대한 회전 구속으로 보여 주었다. 그러나 만일 이를 기존의 점기반 방식으로는 수행한다면 형상을 가진 두 물체의 충돌을 확인하기가 어려워 실제로 두 물체의 많은 교차 부분이 발생해 홀의 직관적인 형상 정보를 얻기가 힘들게 된다.

우선 실험을 위해 홀의 크기를 펙의 크기보다 약간 크게 함으로써 삽입 후에도 펙이 홀 내부의 형상에 의한 구속공간 안에서는 어느 정도 자유롭게 회전할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 펙을 홀에 삽입한 후 펙의 회전축을 중심으로 회전시켰을 때의 회전 구속을 가상현실의 시각정보를 바탕으로 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 4(a)에서는 펙의 일부만 홀에 삽입한 경우로 펙의 하단에서만 홀 형상에 의한 구속을 받으므로 그림에서와 같이 큰 회전범위를 가진 후 회전구속을 받게 된다. 반면에, Fig. 4(b)과 같이 펙을 홀에 전부 삽입한 경우에는 펙의 상하단 모두에서 홀의 형상 구속을 받으므로 Fig. 4(a)의 경우에 비해 작은 회전범위에서 회전구속을 받음을 알 수 있다. 다음과 같이 펙의 자유도는 홀의 형상 구속에 의해 구속 받게 되며, 홀의 형상에 의한 구속공간을 벗어날 경우 구속공간 안으로 복원시키는 힘을 사용자에게 제시함으로써 직관적인 홀의 형상 정보를 얻게 된다.

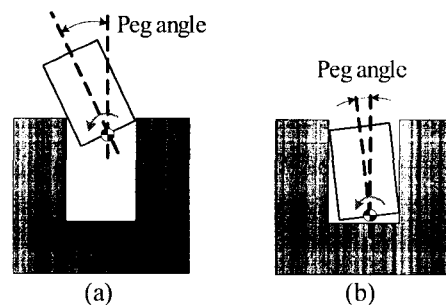


Fig. 4 Peg angle depending on geometrical constraint.

3.1 순응 운동

만약 가상현실로 구현되는 펙인홀 과정에서 발생하는 물체들의 병진 또는 회전 운동과 관련된 힘과 모멘트의 정보를 사용자의 손에 전달하여 줄 수 있다면 보다 현실감 있는 펙인홀 작업을 수행할 수 있을 것이다.

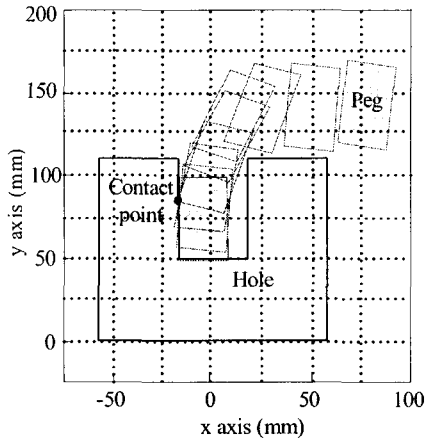


Fig. 5 Trajectory of the peg using HHC

Fig. 5의 실험에서는 펙인홀 과정에서 발생하는 여러 상황 중에서 펙이 홀 내부의 한쪽 면에 접촉하는 1점 지지에 의한 경우를 고려하였다. 일단 펙이 홀의 내부 한쪽 면에서 충돌하게 되면 GJK 충돌감지 알고리즘을 이용하여 두 물체의 접촉시점과 접촉점을 찾아낸다. 이들 접촉 정보를 사용하여 두 물체 사이의 접촉에 의한 힘과 모멘트를 구할 수 있다. Fig. 6는 이를 모델링 작업을 통해 사용자에게 반영되는 받는 힘의 크기를 도시한 결과이다. 여기서 각 물체의 강성은 20N/m로 가정하였다.

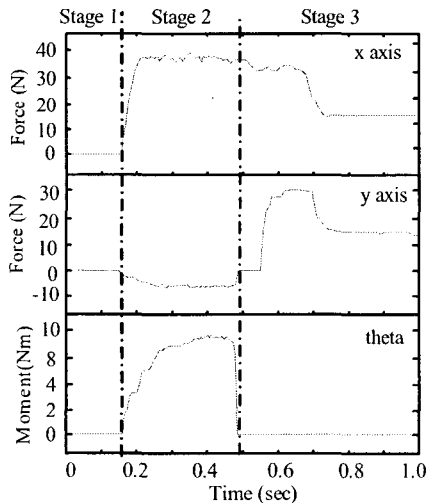


Fig. 6 Responses of force feedback during compliant motion

Fig. 5의 결과를 크게 3단계로 나누어 설명하면, 단계 1에서는 펙이 자유공간 안에서 아무런 제약을 받지 않고 움직이며, 단계 2에서는 펙이 홀 내부의 한쪽 면과 충돌하여 접촉하면서 운동이 수행되는

경우이다. 여기서 충돌 후 모멘트에 의한 펙의 회전운동과 y축 방향으로 펙이 미끄러지는 병진운동이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 운동을 발생시키는 이유는 홀에 대하여 펙의 순응운동(compliant motion)을 부여함으로써 가상현실의 현실감을 부여하기 위해서이다. 단계 3은 펙이 홀 내부의 형상구조속으로 y축 방향으로 반력을 받는 경우이다. 결국 HHC의 사용자는 실제 펙을 홀에 삽입하는 것과 같은 힘/모멘트를 경험하게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 가상환경에서 기존의 점기반이 아닌 형상기반에 따른 힘과 모멘트를 제시하기 위해 GJK 알고리즘을 이용하여 충돌을 감지하고, 이에 따른 충돌 반응을 살펴보았다. 또한, 이를 위한 응용 사례로 HHC와 GJK 알고리즘을 이용하여 부품 조립에 쉽게 활용될 수 있는 펙인홀 작업을 수행하였다. 형상에 기반한 힘 제시는 기존의 점기반 방식에서는 제시하기 힘든 물체 형상에 따른 구속조건을 사용자에게 제시함으로써 사용자가 직관적으로 가상물체의 형상감을 체험할 수 있게 하였다.

참고문헌

1. Burdea G., "Force and Touch feedback for Virtual Reality," A Wiley-Interscience Publishing, 1996.
2. Gibert E.G., Johnson D.W., Keerthi S.S., "A Fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space" IEEE Journal of Robotics and Automation, Volume 4, 1998
3. Colgate, J.E., Stanley, M.C., Brown, J.M. "Issues in the Haptic Display of Tool Use," IEEE/RSJ Int'l Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 140 -145, 1995.
4. Unger, B.J., Nicolaidis, A. "Comparison of 3-D Haptic Peg-in-Hole Tasks in Real and Virtual Environments", IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robotics and System, Vol. 3, pp. 1751 -1756, 2001.
5. 류동석, 손원선, 송재복, "5절링크와 짐벌기구로 구성된 병렬형 6자유도 햅틱 핸드 컨트롤러의 설계," 대한기계학회 논문집 A, 27권, 1호, pp. 18-25, 2003.