가상 현실 환경에서 사람과 로봇 손 파지 방법

서경덕 [1,2], 박정민 [2]
[1] 고려대학교 전기전자공학과
[2] 한국과학기술연구원 지능로봇연구단
lucas917200@gmail.com , pjm@kist.re.kr

Grasp method for human and robotic hand in virtual reality

Kyung-Duk Suh[1,2], Jung-Min Park[2]
[1]Dept. of Electrical Engineering, Korea University
[2]Center for Intelligent & Interactive Robotics, Korea Institute of Science and Technology

요 약

본 논문은 가상 환경에서 사용자 및 로봇이 손을 이용하여 직관적으로 가상 물체와 상호작용하도록 하는 파지 방법을 제안한다. 제안한 방법은 사람 손과 로봇 손의 구조적인 차이를 고려하여 사람과 로봇에게 범용적으로 적용할 수 있도록 물리적 상호작용이 가능한 입자를 가상 손에 붙이고, 이를 이용하여 가상 물체를 파지하는 방법이다. 제안한 파지 방법을 사람과 로봇에 적용하여 실험한 결과, 임의의 다양한 물체를 직관적으로 파지할 수 있었고 높은 성공률을 보였다.

1. 서론

가상 현실은 컴퓨터 등을 활용하여 인공적으로 실재와 유사한 환경을 만들어 내는 HCI 기술이다[1]. 가상 공간에서 사용자는 가상 물체를 조작하거나 가상공간을 돌아다니며 가상 현실과 상호작용한다. 가상 물체와 조작하는 상호작용을 하기 위해 먼저 가상 물체를 선택해야 한다. 가상 물체의 선택은 휴대용 장치를 통해서 가리키는 방식으로 수행할 수 있으나, 깊이 카메라의 발전으로 맨손으로 가상 물체를 잡는(Grasp) 방법이 연구되고 있다. 즉, 사용자의 손을 가상 현실에 투영하여 가상 물체를 직접 잡을 수 있도록 하는 것이다[2][3]. 안전하고 효율적인 작업을 수행하기 위해 가상 환경을 통해 사용자가 로봇과 협업하려는 요구가 대두되고 있으므로 사람과 로봇이 공존하는 가상 공간에서 사람의 손 뿐만 아니라 로봇 손을 이용하여 가상 환경에서 상호작용하는 파지 연구가 필요하다.

사람의 손은 강체와 달리 관절에 의해 변형 가능한 물리적 특징이 있다. 이를 가상 현실에서 구현하기 위해 부드럽고 유연한 물체에 대한 물리력을 제공하는 소프트 바디 시뮬레이션을 사용한다. 하지만 소프트 바디 시뮬레이션은 강체를 다루는 시뮬레이션에 비해 계산량이 많다. 사용자의 움직임에 따라 즉각적으로 반응해야 하는 가상 환경 특성상 소프트 바디 시뮬레이션은 계산량으로 인한 부하로 상호작용의 실시간성을 보장하기 어려워서 몰입감을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 상호작용이 실시간으로 가능하도록 가상 손을 구현하기 위해 강체 파티클을 사용한 연구가 있다[4][5]. W. Quan 은 실린더와 직육면체를 조합하여 간단하게 가상의 손을 구현하고 마찰 및 충돌 예측 모델을 만들어 직관적으로 상호작용하였다[6]. 앞선 연구들은 사람의 손을 구현하는 데 집중하였으며 손의 형태에 따른 크기 차이는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 높은 자유도를 가지는 사람 손을 적은 컴퓨팅 자원으로 표현하여 가상 환경에서 상호작용할 수 있는 파지 방법을 고안하였다. 로봇 손의 경우, 사람의 손에 비해 단순한 형태를 지니고 있으나 오늘날 로봇은 다양한 종류의 그리퍼 형태가 존재한다. 즉 로봇 손마다 재질, 자유도, 손가락의 개수, 길이 등이 다르다. 로봇 그리퍼의 형태에 따라 파지 기법은 달라질 수 있으나, 다양한 형태의 로봇 그리퍼에게 맞게 매번 최적의 파지 알고리즘을 제공하기 어려우므로 특정 로봇 손에 국한되지 않는 범용적인 방법을 만들어 다양한 종류의 로봇 손에 적용할 필요가 있다.

본 논문은 사람과 로봇이 공존하는 가상 현실 공간에서 사람과 로봇이 손으로 가상 물체를 조작하는 상호작용을 하기 위한 파지 방법을 제안하고 구현하였다.

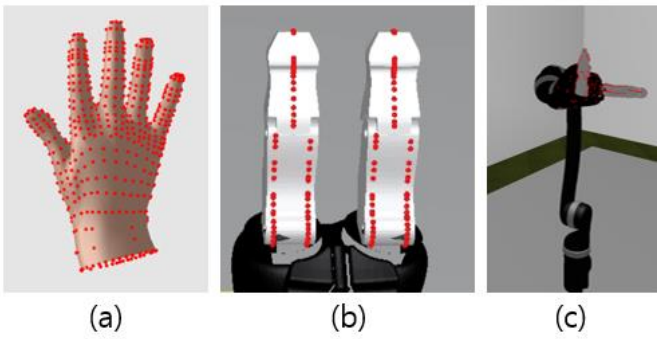
2. 사람-로봇 범용 파지 기법

2.1 가상 환경에서 손의 표현

파지를 수행하는 사람의 손은 사람마다 손의 크기, 각 손가락의 길이, 두께 등 조금씩 다르다. 로봇 손의 그리퍼 또한 로봇의 종류, 용도에 따라 길이, 그리퍼의 수 등 로봇 손가락의 구성이 다르다. 이처럼 서로 다른 손에 대해 차이에 무관한 파지 방법을 고안하기 위하여 일관된 방식으로 가상 손을 물리적으로 정의해 줄 필요가 있다.

3D 물체는 3 차원 꼭짓점 좌표를 나타내는 정점

(vertex), 이들 사이를 선으로 연결한 에지(edge), 세 개 이상의 정점들로 구성되는 면(face)으로 정의된다. 정점은 3D 모델을 표현하는 기본 단위 중 하나이므로 3D 모델의 정점을 추출하여 점으로 구현하면 3D 모델을 모사할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사람의 손 뿐만 아니라 로봇의 손에 대해 물리적으로 충돌 가능한 점인 콜라이더를 3D 모델의 정점들에 부착하여 표현하였다.



(그림 1) (a) 사람의 가상 손 및 콜라이더. (b), (c) 로봇의 가상 손 및 콜라이더.

2.2 파지 알고리즘

제안한 파지 방법은 가상 손의 콜라이더 정보를 이용한다. 물리 엔진을 통해 계산되는 콜라이더의 물리력은 충돌 위치, 충돌 속력, 충돌 방향, 충돌 가속도 등이 있다. 파지 알고리즘은 가상 손에서 충돌이 감지된 콜라이더에 대한 가상 물체와의 충돌 위치, 충돌 각도, 충돌 거리 정보의 물리력을 사용하여 파지의 여부를 판단한다.

Algorithm : Grasp algorithm

```
while Hand contacts object do
    Extract valid collider pairs();
    for all valid collider pairs do
        Check surface angle();
        Check distance between fingers();
    end
end
```

(그림 2) 파지 알고리즘

Hand contacts object 는 가상 손이 가상 물체와 접촉하였는지를 파악한다. 물리 엔진을 이용하여 가상 손을 이루는 콜라이더가 가상 물체와 서로 접촉한 경우, 물리 엔진은 충돌이 감지된 콜라이더의 위치, 속도 등의 물리 상태 정보를 접촉 콜라이더로 저장한다.

Function Extract valid collider pairs()

```
if Contacts detected on thumb then
    if Contact occurs on index or middle Finger then
        Save following collider pairs;
        return true
    else
        return false
    end
else
    return false
end
```

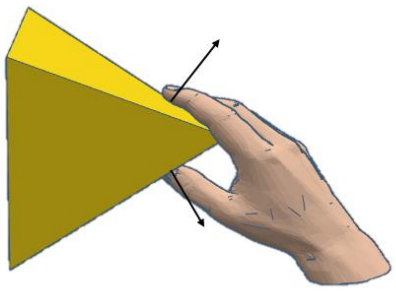
(그림 3) 유효한 콜라이더 검출

Extract valid collider pair 는 접촉 콜라이더가 파지를 위해 유효한 위치에서 발생한 콜라이더인지 여부를 확인한다. 유효한 위치란, 손의 구조상 파지를 수행하는데 필수적인 손가락 사이에서 충돌이 발생했는지 여부를 검사하는 데 쓰이는 위치이다. 예를 들면 접촉이 엄지의 콜라이더와 검지의 콜라이더 사이에서 발생한 경우 가상 물체를 파지할 수 있으나, 엄지에서 발생한 서로 다른 두 콜라이더를 통해서는 파지가 불가능하므로 유효한 콜라이더에서 제외한다. 검증을 통해 유효한 콜라이더임이 판단된 경우 필수적인 손가락에서 발생한 접촉 콜라이더 i 개와 그 외의 손가락에서 발생한 접촉 콜라이더 j 개를 각각 하나씩 조합하여 유효 콜라이더 쌍으로 저장한다. 유효 콜라이더 쌍의 총개수는 ${}_iC_1 \times {}_jC_1$ 개이다. 저장한 유효 콜라이더 쌍에 대해서 파지에 적합한 각을 이루는지 확인하는 Check surface angle 을 실행한다. 만약 저장된 유효한 콜라이더 쌍이 없으면 가상 물체는 해제(release) 상태가 된다.

Function Check surface angle()

```
Generate normal vector perpendicular to contact face;
Calculate vector Angle θ;
if Angle θ > Threshold then
    return true
else
    return false
end
```

(그림 4) 콜라이더의 접촉 각도 계산



(그림 5) 가상 물체와 가상 손의 접촉 각도 예

Check surface angle 은 앞선 과정에 의해 분류된 유효한 콜라이더 쌍에 대해 파지가 발생할 수 있는 충분한 접촉 각도가 형성되는지 검사한다. 그림 5 와 같이 손과 접촉이 발생한 가상 물체의 면을 파악한 후, 각 면에 해당하는 법선 벡터를 구한다. 충돌이 일어난 각 면에 대한 법선 벡터 사이의 각도가 파지에 필요한 충분한 임계값 이상이면 파지가 가능하므로, 파지 여부를 결정하는 Check_distance_between_fingers 를 실행한다. 접촉 각도가 임계값 이하로 작으면 해제 상태가 되어 파지 되지 않으며 가상 물체를 놓치게 된다.

Function Check distance between fingers()

Get fingertip information from hand tracker;
$dist_{mn}$:= Euclidean distance between fingers;
//m = no. of dominant fingers;
//n = no. of supporting fingers;
if $\forall dist_{mn} < Threshold$ **then**
    Status = Grasp;
    Object Physics Type = Kinematic;
    Object transformation by hand;
    return *true*
else
    return *false*
end

(그림 6) 손끝 거리 유효성 검사

로봇 손은 형태가 다양하며 형태에 따라 각 손가락이 펴질 수 있는 정도가 다르다. 사람의 손은 사용자의 손 크기에 따라 손가락이 벌어지는 최대 범위가 다르다. 접촉이 이루는 각도만을 고려하면 가상 물체가 손가락 사이에 끼어 있는 상태를 파지 상태로 판단하게 된다. 손을 추적하는 카메라로부터 획득한 손가락 끝(fingertip) 정보를 이용하여 파지에 관여하는 손가락 끝 사이의 거리를 계산하고 임계값 이하이면 파지를 수행한다. 임계값 이상이면 손이 크게 벌어진 경우이므로 손은 해제 상태가 되고 가상 물체를 놓치게 된다.

앞서 기술한 일련의 과정을 통해 가상 물체와 접촉한 콜라이더 쌍이 유효한 위치에 놓여있으며 이루는 각도와 거리가 파지 범위에 놓이면 파지 상태가 된다. 파지 상태로 결정되면 가상 물체의 물리 속성을 Kinematic 으로 변경한다. 파지 된 가상 물체가 해제될 때까지 가상 물체는 조작하는 사용자의 가상 손에 의해 움직이게 된다. 가상 물체가 해제되면 가상 물체의 물리 속성을 Dynamic 으로 환원하여 물리 시뮬레이션에 의해 움직이도록 한다.

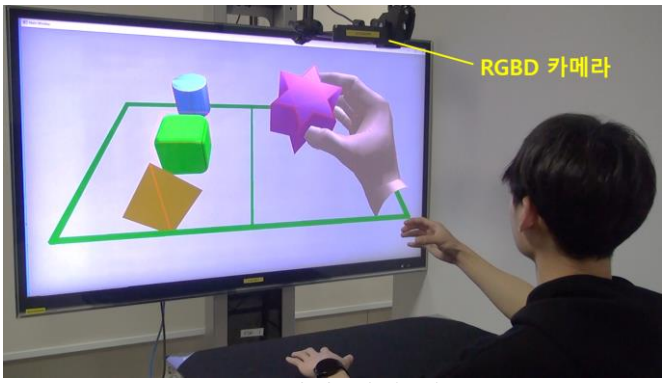
$$ {}^{Global}_{Hand}T = \begin{bmatrix} R_{Hand} & P_{Hand} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) $$

$$ {}^{Global}_{Obj}T = {}^{Global}_{Hand}T \times {}^{Hand}_{Obj}T \quad (2) $$

파지 된 가상 물체는 물리 속성을 Kinematic 으로 변경하여 더 이상 중력 등에 따라 위치 및 속도가 결정되지 않도록 하였다. 파지 된 경우 가상 물체의 위치는 손의 위치 관계를 나타내는 식 1, 2 를 통해 결정된다. 이때, P 는 전역 좌표계에서의 손 중심 위치이며, R 은 손 중심에서의 회전 행렬이다.

3. 실험

손 추적을 위해 RGBD Primesense 카메라를 손 위에 설치하였으며 3Gear Systems SDK 를 사용하여 맨손 추적이 가능한 가상 현실 환경 시스템을 구축하였다. 로봇은 Kinova Jaco[7]를 사용하였으며 ROS 로 구동하였다. 물리 엔진은 Bullet Physics SDK 2.83[8]을 이용하여 콜라이더의 충돌 정보와 물리적인 정보들을 파악하였다. 콜라이더로는 물리 엔진이 시뮬레이션하는 기본 단위 모양인 프리미티브 구형(primitive sphere) 형태를 채택하였으며, 반경은 1mm 로 구현하였다. 물리 시뮬레이션의 계산량 부하를 줄이기 위해 가상 손에 대한 3D 모델에 임의의 정점을 추출하여 콜라이더를 부착하였다.

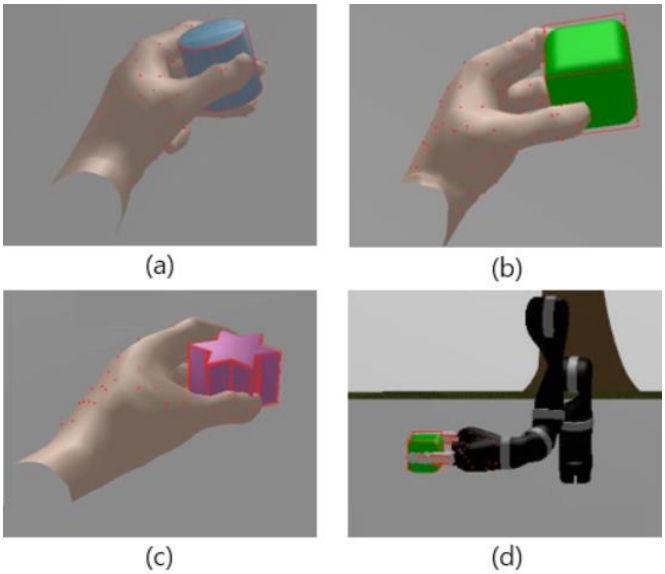


(그림 7) 가상 현실 시스템

실험은 5 종의 가상 물체(정육면체 블록, 원통형 블록, 삼각뿔 블록, 구 블록, 별 기둥 블록)에 대해 매회 임의의 가상 물체가 가상 공간에 제시되면 파지하도록 하였다. 제안하는 파지 방법은 사람과 로봇에 대해 각각 실험하였다. 실험에 참여한 사용자는 9 명이다. 사용자 중 7 명은 가상 공간에서 가상 물체와 상호작용을 해 본 경험이 없는 사람들이었으며, 2 명의 사용자는 가상 환경과 가상 물체의 조작을 수행해본 경험이 있는 사용자였다. 실험한 로봇 손은 3-Finger Kinova Jaco 이다.

사용자 실험 결과, 파지 성공률은 평균 92%였다. 파지 실패는 주로 파지하는 손의 자세에 따라 손가락 가림에 의해 발생했다. 즉, 손바닥이 바닥을 향한 상태로 가상 물체를 잡으려고 하면 손가락이 손등에 가려지거나 다른 손가락에 의해 손가락이 가려서 손 위에 설치되어 있는 손 추적 카메라가 손을 제대로 인식하지 못하는 경우가 발생했기 때문이었다. 또한, 가상 현실에서 거리감과 공간감이 부족하다는 주관적 의견이 있었다. 공간감이 부족한 경우, 가상 손으로 가상 물체를 밀어 가상 물체가 멀리 밀려나거나 아직 가상 물체까지 손이 도달하지 않았는데도 도달하였다

고 판단하여 파지를 시도하는 경우가 있었다. 로봇 손의 경우 가상 물체에 대해 정확한 위치 정보를 전송 받으며, 그림 8 (d)와 같이 일정한 자세를 취하므로 손가락 가림이 발생하지 않아서 파지 성공률은 100%였다.



(그림 8) 파지 실행의 예 (a) 사용자의 원통형 블록 파지 (b) 사용자의 정육면체 블록 파지 (c) 사용자의 별 기둥 블록 파지, (d) 로봇의 정육면체 블록 파지

4. 결론

본 논문에서는 가상 현실 공간에서 사용자 및 로봇이 손을 이용하여 가상 물체를 직관적으로 조작하기 위한 파지 방법을 제안하였다. 사람과 로봇에게 일관된 방법으로 파지할 수 있도록 물리 엔진을 통해 도출된 물리 입자를 가상 손의 손가락 모델에 부착하고 이를 이용하여 가상 물체와의 물리적 관계를 분류함으로써 파지 여부를 결정하였다. 파일럿 테스트 결과 사용자에 대한 파지 성공률은 92%였고, 로봇은 100% 성공률을 보였다. 향후 좀 더 다양한 가상 물체에 대해 사용자 실험을 수행하고 사람과 로봇 간 협업 조작에 대한 연구를 수행할 계획이다.

사사의 글

이 논문은 KIST 주요사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2E31581).

참고문헌

[1] J. M. Zheng, K. W. Chan and I. Gibson, "Virtual reality," in *IEEE Potentials*, vol. 17, no. 2, pp. 20-23, April-May 1998

[2] Y. Kim and J.-M. Park, “Talon Metaphor: Grasp and Release Method for Virtual Reality,” HCI International 2018, pp. 289-295.

[3] Wenping Zhao, Jianjie Zhang, Jianyuan Min, and Jinxiang Chai. 2013. Robust realtime physics-based motion control for human grasping. ACM Trans. Graph. 32, 6, Article 207 (November 2013), 12 pages.

[4] J.-S. Kim and J.-M. Park, “Physics-based hand interaction with virtual objects,” in Robotics and Automation, 2015. Proceedings. ICRA’15. IEEE International Conference on. IEEE, 2015.

[5] O. Hilliges, D. Kim, S. Izadi, M. Weiss, and A. Wilson, “Holodesk: direct 3d interactions with a situated see-through display,” in Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2012, pp. 2421–2430.

[6] W. Quan, H. Yang, C. Han and Y. Li, "Realistic Interaction System for Human Hand in Virtual Environments," 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), 2020, pp. 772-778

[7] Kinova Jaco, [Online]. Available: https://assistive.kinovarobotics.com

[8] Bullet Physics, [Online]. Available: http://bulletphysics.org/