

---

# 제약 조건 기반의 실시간 게임 물리엔진 제작기법

## A Constraint-based Technique for Real-Time Game Physics Engine

이민경, Minkyoung Lee\*, 김영준, Young J. Kim\*\*

**요약** 게임 환경에서 객체 행동의 사실감을 유지하기 위한 물리 엔진 부분 중 가장 활용도가 높은 요소인 강체 역학을 사용자와의 실시간 인터랙션이라는 요구에 맞추어 효과적이면서 정확하게 수행하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 일이다. 이를 위하여 본 논문에서는 연속적 충돌검사 기법을 이용한 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션을 구현하였다. 본 논문에서 구현된 시스템은 크게 충돌 검출 부분과 충돌 처리 부분으로 구성된다. 특히 충돌검출을 위해 연속적 충돌검사를 이용하여 충돌 검출 실패를 없앴으며, 정확한 처음 충돌 시간과 충돌 피처를 이용하여 기존의 방법에 비해 보다 정확하며, 충돌 피처의 수도 효과적으로 줄일 수 있었다. 또한 제약 조건 기반의 시뮬레이션 기법에 따라 충돌 처리 부분은 충격력에 대한 선형 상보성 문제로 다루어 계산하여, 충돌에 의한 강체의 올바른 역학 반응을 생성하였다.

**Abstract** In 3D gaming environment, it is important to simulate the physically plausible behaviors of gaming objects in real time. In particular, rigid body dynamics consists in the heart of most game physics. In this paper, we present a constraint-based rigid body simulation method using continuous collision detection as a collision detection method, and LCP formulation as a collision response method. The continuous collision detection method never misses any collisions and thus is able to accurately report the first time of collision as well as its associated colliding features. Moreover, since the number of colliding features is typically low, it also reduces the complexity in the LCP formulation.

**핵심어:** *Rigid Body Dynamics, Continuous Collision Detection, Linear Complementarity Problem*

---

본 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구과제(KRF-2007-D00400)에 의하여 지원되었음.

\*이민경: 이화여자대학교 컴퓨터정보통신공학과 e-mail: [minkyounglee@ewhain.net](mailto:minkyounglee@ewhain.net)

\*\*김영준: 이화여자대학교 컴퓨터정보통신공학과 교수; e-mail: [kimy@ewha.ac.kr](mailto:kimy@ewha.ac.kr)

## 1. 서론

3 차원 그래픽스에서의 렌더링 기술의 향상에 따라 게임에서도 영화에 근접한 질의 실감나는 영상을 보여 줄 수 있게 되었으며, 그에 따라 게임에 등장하는 캐릭터 및 객체들 또한 현실적인 물리법칙에 기반한 사실적인 움직임을 보여주기를 요구 받게 되었다. 게임에서의 현실적인 물리 반응은 게임의 사실감을 향상시켜 사용자의 게임 몰입도를 높이는데 필수적인 요소가 되었다. 하지만 게임 환경은 영화와는 달리 사용자와의 실시간 인터랙션을 요구하므로 물리 시뮬레이션을 30FPS 이상의 속도로 수행하여야 하며, 이를 수행하기 위한 것이 게임 물리 엔진이다. 특히 게임에서 다루는 사용자 캐릭터를 포함한 주요 객체들은 대부분 강체 혹은 강체로 이루어진 관절체로 간주가 가능하며, 이 객체들간의 충돌반응과 쌓임 및 파괴 등이 게임의 중요한 물리적 요소가 된다. 그러므로 강체 역학 시뮬레이션은 게임 물리 엔진의 기본 바탕으로 대부분의 게임 물리 엔진의 필수 요소라 할 수 있다.

본 연구는 실시간 게임 물리엔진을 위하여 새로운 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션을 구현하고자 하였다. 제약 조건 기반의 방법은 정확하면서도 빠르고 안정적인 강체 역학 시뮬레이션 기법으로 알려져 있다. 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션을 구현하기 위해서는 정확한 충돌을 검출해 낼 수 있는 연속적 충돌 검사방법(Continuous Collision Detection, CCD)과 충돌검사 기법과 이에 대한 충돌반응을 선형 상보성 문제 (Linear Complementarity Problem, LCP)를 이용하여 효율적으로 계산하는 기법이 필요하다. 하지만 연속적 충돌검사 방법이 본격적으로 도입된 것은 최근의 일로 이를 강체의 역학과 성공적으로 연결시킨 경우는 매우 드물다. 특히 거리 기반의 CCD 와 LCP 를 이용한 충돌 처리를 연결시킨 경우는 아직 없다.

## 2. 관련연구

### 2.1 연속적 충돌검사

충돌검사는 공간상에서 두 물체간의 중첩(overlap)을 검사하는 기법이다. 게임과 같은 대부분의 실시간 그래픽스 어플리케이션의 가상 공간에서 객체의 물리적인 행동을 구현해내기 위해서는 우선 빠르고 정확한 충돌검사가 필수적으로 요구된다.

충돌검사 방법은 크게 단속적인 충돌검사(discrete collision detection) 방법과 연속적인 충돌검사 방법이 있다. 단속적인 충돌검사 방법은 불연속적으로 주어진 시간에서 주어진 물체의 위치만 가지고 충돌 검사를 수행하는 방법이다. 그러나 이 방법은 물체의 정확한 충돌이 아닌 침투를 검사하며, 이를 다시 백트래킹 해야 하는 등의 오버헤드가 있다. 또한 물체가 빠른 속도를 가지고 있거나 물체의 두께가 얇다면 충돌이 일어났음에도 불구하고 전혀 이를 검출하지 못하는 경우가 발생한다는 약점이 잘 알려져 있다. 반면에 연속적 충돌검사는

불연속적인 시간 간격들에서 주어진 물체의 위치를 임의의 움직임으로 보간하여 연속적인 모션을 만들어 이에 대한 충돌을 검사한다. 그러므로 충돌을 놓치지 않으며, 정확한 처음 충돌 시간(Time of Contact, TOC)과 그 위치 및 피쳐를 알아낼 수 있다[5, 7, 8].

### 2.2 강체 역학 시뮬레이션

컴퓨터 그래픽스에서 일반적으로 강체의 역학을 시뮬레이션 하는 방법에는 크게 패널티 기반(penalty-based)의 방법, 충격력 기반(impulse-based)의 방법, 제약 조건 기반(constraint-based)의 방법이 있다. 현재 대부분의 게임에서는 계산 비용을 줄이기 위하여 객체들간의 침투를 일부 허용하고 그에 따라 충돌 반응 또한 정확하지 않기 때문에, 게임상에서 비현실적인 객체의 오버랩을 발생시킨다. 또, 그로 인해 객체에 부자연스러운 충돌 반응이 일어나기 때문에 사용자가 게임에 몰입하는 것을 방해한다. 이와 같은 문제에 대한 대안으로써 제약 조건에 기반한 방법이 있다. 이 방법은 비침투 제약(non-penetration constraint) 조건을 바탕으로 하여 물체의 충돌 순간에 물체간의 침투를 막고 물리적으로 올바른 반응을 생성해 내기 위한 구속력 및 충격력을 계산해 물체의 상태에 더한다[1, 2]. 비침투 제약 조건을 보장하는 것은 상대적으로 복잡한 구현을 요구하나, 안정적이고도 효과적인 시뮬레이션을 보장하는 것으로 알려져 있다.

### 3. 점진적 접근법을 이용한 연속적 충돌검사

본 연구에서는 효율적이면서 정확한 실시간 게임 물리를 구현하기 위한 충돌검출 방법으로써 일반화된 점진적 접근법(Conservative Advancement, CA)에 의한 연속적 충돌검사 기법을 이용하였다. 점진적 접근법은 TOC 의 상한선을 계산하기 위한 방법이다[4]. 이 기법은 움직이는 볼록형(convex) 객체로 이루어진 환경상에서 정확한 충돌을 검출하기 위해 움직이는 물체의 이동경로의 한계를 계산하여, 이에 대한 가능한 TOC 를 근사하여 그 TOC 까지 물체를 접근 시킨다.

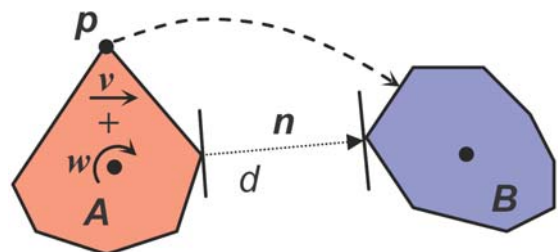


그림 1. 점진적 접근법

즉, 그림 1 에서와 같이 속도  $v$  및 각속도  $w$  를 가지고 움직이는 물체를 A 라 하고 그에 대해 충돌을 검출하기 위한 대상을 B 라 하자.  $p$  는 A 의 임의의 점이며  $n$  은

물체간의 최단 거리의 방향(closest direction)이다. 이 가정은 두 물체가 모두 움직이는 경우에도 한 물체에 대해 다른 물체의 상대적인 모션을 취함으로써 일반 될 수 있다. 두 연속적인 시간 간격상에서 물체 A의 속도를 선형이라 가정하여 움직임을 보간하고, 충돌이 일어나지 않는 상한의  $\Delta t$ 를 구하여 이 시간에 대한 A의 움직임을 진행한다. 이 과정을 사용자가 지정한 거리 오차 내에 도달 할 때까지 반복하면 정확한 처음 TOC를 알아낼 수 있다. 이 방법은 기본적으로 볼록형 물체에 적용 가능한 방법이지만 본 연구에서는 이 방법을 일반적인 일반형(non-convex) 객체에 확장한 기법을 이용하였다. CA를 일반형 물체에 적용하기 위해서는 그 물체를 컨벡스 조각으로 분해하여 하여 컨벡스 쉘(Convex hull-based) 기반 바운딩 볼륨 계층 구조(Bounding Volume Hierarchy, BVH)를 구성하여 계층적인 점진적 기법을 수행한다. 이 기법은 단지 단속적인 충돌검사 기법에 비해 약간의 오버헤드만 가지고도 일반적인 물체에 대한 정확하고 효율적인 연속적 충돌검사를 수행 할 수 있다. 두 물체에 대한 가정을 바탕으로 더 많은 수의 강체에 대한 복잡한 경우의 시뮬레이션으로 확장하는 것은 간단한 일이다[8].

↓

#### 4. 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션

효과적이고 정확한 강체의 충돌반응(collision response)을 구현하기 위하여 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션을 이용한다. 제약 조건 기반의 강체 역학 시뮬레이션은 충돌처리를 위한 제약 조건으로 객체들간에 비침투를 유지해야만 한다. 비침투 조건을 지키기 위해서는 먼저 정확한 충돌 검출이 필수적이며 검출된 충돌점과 객체의 상태에서부터 침투를 막으면서 올바른 역학 반응을 생성하는 충격력을 계산하여 물체의 상태에 더해줘야 한다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 연속적 충돌검사로 정확한 충돌 순간과 그에 대한 충돌 피쳐를 얻고, 이로부터 생성한 충격력에 관한 제약식을 풀기 위하여 LCP를 이용하였다.

구체적으로 충돌 처리 과정은 다음과 같다. 각 충돌점  $i$ 에 대해 강체의 충돌에 관한 일반적인 물리법칙에 따른 충격력  $J_i = j_i \hat{n}$ 이 존재한다. 충격력은 충돌하는 강체가 서로 접근하여 침투하는 일이 일어나지 않도록 하고 충돌에 따른 올바른 물리반응이 일어나도록 한다. 충격력의 방향  $\hat{n}$ 은 충돌에 수직인 방향으로 연속적 충돌검사로부터 얻어지며, 충격력의 크기  $j_i \geq 0$ 가 계산해야 할 양이다. 즉 모든 충돌점에 대한 충격력의 크기  $\vec{j}$ 를 구하여 물체에 더하면 충돌하는 물체는 서로 접근하는 것을 멈추거나 튕겨나야 한다. 이를 만족하기 위해서는 충돌 전 속도  $v_i^-$ , 충돌 후 속도  $v_i^+$  및 반발계수  $\epsilon$ 에 대한 물리 관계식인  $v_i^+ = -\epsilon_i v_i^-$ 을 따라야 한다. 반발계수는 0과 1 사이의 값으로,  $\epsilon = 1$ 인 경우에는 충돌에 의한 에너지 손실이 없음을 뜻한다. 여러 물체의 동시 충돌(simultaneous collision)을 고려하기 위해서  $v_i^+ \geq -\epsilon_i v_i^-$ 의 제약 조건을 이용한다.  $v_i^+$ 는  $\vec{j}_i$ 의 선형 함수이므로 최종적으로 제약 조건은 다음과 같은

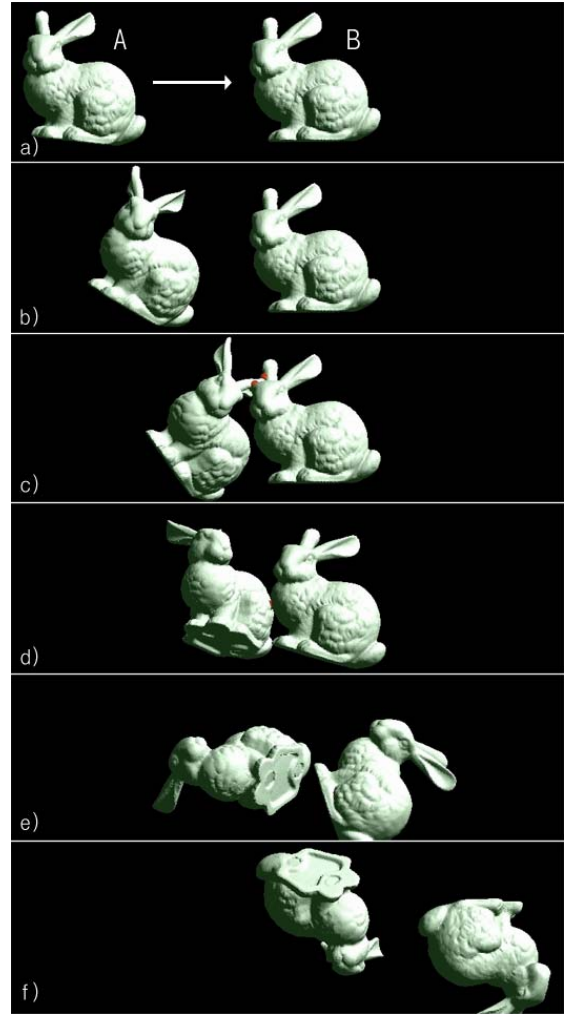


그림 2. 복잡한 물체의 충돌 시뮬레이션

↓

문제를 구성하며, 이는 선형 상보성 문제의 형태로 LCP solver를 이용하여 효율적으로 계산 할 수 있다.

$$v_i^+(\vec{j}) + \epsilon_i v_i^- \geq 0, j_i \geq 0, \vec{j}(v_i^+(\vec{j}) + \epsilon_i v_i^-) = 0 \quad (1)$$

본 논문에서 제안한 방법은 기존의 방법과는 달리 충돌검출을 위해 연속적 충돌검사를 이용하여 충돌을 놓치지 않으며, 정확한 처음 충돌의 피쳐를 이용하므로 처리해야 할 충돌의 수 면에서 훨씬 효과적이다. 또한 침투를 허용하지 않으려는 제약 조건 기반의 방법의 취지에 잘 부합하며 실제 역학 법칙에 바탕하므로 충돌 반응이 정확하고 현실적이다.

↓

#### 5. 구현 및 결과

연속적 충돌검사를 위하여 FAST library, 선형 상보성 문제의 풀이를 위하여 Dantzig 알고리즘에 기반한 LCP solver library[3]를 이용하여 실시간 강체 역학 및 충돌 반

응을 구현하였다.

구현한 방법의 벤치마킹을 위하여 삼각형 메쉬로 구성된 일반적인 모델을 가지고 강제 역학 반응을 테스트 하였다. 테스트에 이용한 버니 모델은 70K 개의 삼각형으로 이루어져 있다. 그림 2는 강제 역학 시뮬레이션을 위한 기본적인 시나리오인 두 물체의 충돌 과정을 보여준다. 물체 A는 물체 B가 있는 화살표 방향의 초기 속도를 가지고 움직인다. 그림 2의 c에서는 물체 A가 물체 B에 부딪혀 두 지점에서 충돌이 일어난 부분을 빨간 점으로 표시 하고 있다. 충돌점에 대하여 충돌처리 과정이 진행되고 물체는 에너지를 교환하여 새로운 속도 및 상태를 갖게 된다. 즉 물체는 서로 튕겨나는 반응을 보인다. 충돌 반응이 일어나 튕겨 후 d에서 한번 더 충돌이 발생하는 모습이 보이고 있다. 마찬가지로 다시 충돌 처리에 따라 부딪친 후 서로 튕겨나는 반응을 생성한다.

충돌이 포함된 시뮬레이션 프레임에 대해 수 개 내지 수십 개의 충돌이 발생하며 이를 처리하는 데에는 3~50ms 가 소요된다. 연속적 충돌검사를 이용함으로써 충돌이 정확하고 상대적으로 충돌개수가 많지 않아 효율적이고 안정적인 충돌 반응 생성이 가능하다.

## 6. 향후 연구

본 연구에서 이용한 점진적 기법에 의한 연속적 충돌검사에는 초기 위치에 있는 물체는 다른 물체와 접촉하고 있지 않아야 한다는(collision free) 제약이 있다. 따라서 물체가 다른 물체 위에 얹혀서 정지해 있거나(resting) 미끄러지는(sliding) 경우와 같이 처음부터 물체가 다른 물체와 접촉상태에 있는 비충돌 접촉(non-colliding contact)은 다루기가 힘들다. 이러한 문제를 보완하기 위해, 물체들이 서로 접근하더라도 가시적으로는 인지되지 않을 정도의 여유 거리를 항상 가지도록 하여 항상 비접촉 상태를 유지해야 한다. 즉, 컬리전 엔블롭(collision envelope) 혹은 시큐리티 디스턴스(security distance) 등을 이용한 충돌 처리의 개선이 필요하다. 또한 마찰력을 고려한 보다 일반적인 물

리 시뮬레이션으로 확장할 필요가 있다.

## 참고문헌

- [1] D. Baraff, "Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol. 23, pp 223-232, July 1989.
- [2] D. Baraff, "Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol. 28, pp 23-34, 1994.
- [3] R. W. Cottle and G. B. Dantzig, "Complementary pivot theory of mathematical programming", Linear algebra and its applications, Vol. 1, pp. 103-125, 1968.
- [4] B. Mirtich, "Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, December, 1996.
- [5] S. Redon, A. Kheddar, S. Coquillart, "CONTACT: Arbitrary in-between motions for collision detection", Proc. IEEE International Workshop on Robot-Human Communication, 2001.
- [6] S. Redon, A. Kheddar, and S. Coquillart, "Gauss' least constraints principle and rigid body simulations", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002.
- [7] S. Redon, A. Kheddar, and S. Coquillart, "Fast continuous collision detection between rigid bodies", Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2002.
- [8] X. Zhang, M. K. Lee, Y. J. Kim, "Interactive Continuous Collision Detection for Non-Convex Polyhedra", Visual Computer (Proc. Pacific Graphics), Vol. 22(9-11), 2006.