

효율적인 연속 충돌감지를 위한 프리즘 기반의 메쉬 컬링 기법

우병광⁰ 유효선* 최유주^{00,+}

서울벤처정보대학원대학교 컴퓨터응용기술학과^{0, 00}

서울벤처정보대학원대학교 VCAR 연구실*

e-mail : {bkwoo⁰, yjchoi⁰⁰}@suv.ac.kr, babydigital@hanmail.net*

Prism-based Mesh Culling Method for Effective Continuous Collision Detection

Byung Kwang Woo⁰, Hyo Sun You^{*}, Yoo-Joo Choi^{00,+}

Dept. of Compute Science and Application, Seoul University of Venture and Information^{0, 00}

VCAR Lab., Seoul University of Venture and Information*

요 약

본 연구에서는 다각형 메쉬 모델들에 대한 시뮬레이션 수행시 주요 병목현상으로 제기되는 충돌감지의 효율성을 높이기 위하여, 연속 시간사이에서 이산시간 스위프트로 형성된 프리즘을 단위로 하는 효율적 메쉬 컬링 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 우선, 연속 시간사이에서 대응되는 두 삼각형을 이용하여 프리즘을 정의하고, 프리즘 단위의 폐쇄검사(Occlusion Query) 기반 가시성 테스트(Visibility Test)를 실시하여, 교차 가능성이 없는 프리즘을 세부 충돌테스트의 대상에서 제외시킨다. 또한, 가시성 테스트 결과로 추출된 프리즘의 충돌가능 집합(PCS: Potential Colliding Set)에서 충돌 가능성이 없는 프리즘의 쌍들을 분리축 테스트(SAT: Separating Axis Test)을 기반으로 분류하는 협대역 컬링(Narrow Band Culling)을 수행한다. 분리축 테스트 시, 두 프리즘의 영역을 각각의 반공간(Half Space)에 포함시키는 평면을 정의하고 이에 수직인 주축을 정의하여, 단일 주축에 대한 분리 검사를 수행함으로써 수행 효율성을 높인다. 제안기법의 성능을 평가하기 위하여 서로 다른 크기의 벤치마크 모델을 선정하고, 제안 기법 적용 전후의 세부 충돌검사 대상 프리즘 쌍의 수를 비교 하였다. 또한, 단일 주축에 대한 분리축 테스트 기반 컬링의 효율성을 입증하기 위하여, 프리즘 쌍에 대한 가시성테스트 실험 결과와 비교하였다. 2916개와 2731개의 삼각형으로 구성된 두 메쉬모델에 대한 컬링 실험에서, 제안 컬링기법 적용시 99%의 효과적인 컬링결과를 얻었다.

Abstract

In this paper, we present a prism-based mesh culling method to improve effectiveness of continuous collision detection which is a major bottleneck in a simulation using polygonal mesh models. A prism is defined based on two matching triangles between a sequence of times in a polygonal model. In order to detect potential colliding set(PCS) of prisms between two polygonal models in a unit time, we apply the visibility test based

+ 교신저자, yjchoi@suv.ac.kr

on the occlusion query to two sets of prisms which are defined from two polygonal models in a unit time. Moreover, we execute the narrow band culling based on SAT(Separating Axis Test) to define potential colliding prism pairs from PCS of prisms extracted as a result of the visibility test. In the SAT, we examine one axis to be perpendicular to a plane which divides a 3D space into two half spaces to include each prism. In the experiments, we applied the proposed culling method to pairs of polygonal models with the different size and compared the number of potential colliding prism pairs with the number of all possible prism pairs of two polygonal models. We also compared effectiveness and performance of the visibility test-based method with those of the SAT-based method as the second narrow band culling. In an experiment using two models to consist of 2916 and 2731 polygons, respectively, we got potential colliding prism pairs with 99 % of culling rate.

키워드: 연속충돌감지, 컬링, 가시성 테스트, 분리축 기반 테스트

Keywords: Continuous Collision Detection, Culling, Visibility Test, Separating Axis Test

1. 서론

가상현실(VR)과 증강현실(AR)을 기반으로 한 게임, 의료 시뮬레이션 등의 분야에서는 현실감을 향상시키기 위하여 상호작용기술을 적용하고 있다. 이러한 실시간 상호작용을 구현하기 위하여 요구되는 핵심기술의 하나가 실시간 충돌감지이다. 특히, 의사를 양성하는 교육용 수술 시뮬레이션이나 조종사 양성을 위한 항공기 조종 시뮬레이터 등에 정확성 높은 현실감을 제고하기 위하여 세밀하고 정확한 충돌감지 기법의 적용이 요구되고 있고, 정확한 충돌감지를 위하여 연속 충돌 감지 기법들이 적용되고 있다.

연속 충돌감지 기법은 이산 충돌감지 기법에서 놓칠 수 있는 단위 시간 사이에서의 충돌을 감지할 수 있는 보다 정확한 충돌감지 기법이나 주요 병목현상으로 부각되어 여러 응용 분야에서 그 효율성을 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 연속 충돌감지의 주요 병목현상의 원인은 대상 객체들간의 단위 시간내 충돌 여부를 판별하기 위하여 복잡한 충돌 해를 구하거나[2,3,4], 점진적 접근 기법(conservative advancement) [5,6]등을 적용하여야 하기 때문이다. 그러므로, 실시간 처리를 위하여, 단위 시간내에 충돌 가능성이 없는 폴리곤들을 최대한 연속충돌감지 테스트 대상에서 사전에 제외시키는 효율적인 컬링 기법이 요구되고 있다.

컬링기술은 충돌감지 알고리즘에서 고비용을 차지하고 있는 객체 구성요소간 세부 충돌감지 계산을 수행하기 전에, 객체를 둘러싸고 있는 바운딩 볼륨 단위 혹은 세부 구성요소 단위에서 간단한 충돌 가능 테스트를 통하여 충돌 가능성이 전혀 없는 구성요소들을 추출하여, 세부 테스트 대상의 구성요소 수를 줄이는 방법이다.

객체 모델간 효율적인 컬링 기법으로 모델에 대한 바운

딩 볼륨 계층구조(BVH: Bounding Volume Hierarchy)를 기반으로 한 기법을 들 수 있다[2, 7]. 강체의 경우, 초기의 형태가 고정적으로 유지되기 때문에 객체의 형태 특성을 표현하는 바운딩 볼륨의 계층적 자료구조를 전처리 단계에서 구축하고, 온라인 시뮬레이션 단계에서 미리 구축된 계층적 자료구조를 이용하여 객체간 충돌 가능 구성요소의 집합을 추출할 수 있다. 그러나, 바운딩 볼륨 계층구조 기반 방법은 충돌감지 대상 모델의 구성 메쉬의 수가 많은 경우, 컬링 기법을 적용하기 전 간단하지 않은 전처리(Pre-processing) 단계를 수행하여야 하고, 바운딩 볼륨 계층구조의 깊이가 깊지 않은 경우, 컬링의 효과가 떨어질 수 있다.

본 논문에서는 바운딩 볼륨 기반 충돌감지의 방법과 같이 복잡한 전처리 과정을 요구하지 않고, 입력 모델의 형태적 제약이 없으며, 효율적인 연속충돌감지에 적합한 프리즘 단위의 메쉬 컬링 기법을 제안한다. 본 제안 방법은 GPU의 폐쇄검사를 기반으로 한 가시성 테스트를 통하여 단위 시간내에 충돌 가능한 프리즘의 집합을 일차적으로 추출하고, 가시성 테스트 결과 얻게 된 프리즘 집합에서 충돌 가능성이 전혀 없는 프리즘의 쌍을 분리축 테스트(SAT: Separating Axis Test)를 통하여 검출함으로써, 보다 최소화된 충돌가능 구성요소 집합을 추출한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 움직이는 모델에 대해 기존 충돌감지 기법을 분류하고, 이들 방법이 적용하고 있는 컬링 기법에 관한 내용을 살펴본다. 3장에서는 제안된 컬링 기법에 대한 개요를 서술하고, 4장에서는 제안하는 2단계 컬링 기법에 관한 세부 내용을 서술한다. 5장에서는 서로 다른 복잡도의 다각형 메쉬 모델에 대한 실험 결과를 기술하고, 마지막으로 6장에서는 결론과 향후 연구

과제로 끝을 맺는다.

2. 관련연구

충돌감지는 컴퓨터 그래픽스, 로보틱스 그리고 계산적인 기하 문헌에서 널리 연구되어 왔다[8]. 기존 충돌감지 기법은 크게 감지 시점을 기준으로 하여 이산 충돌감지(Discrete Collision Detection)와 연속 충돌감지(CCD : Continuous Collision Detection)로 구분된다. 본 절에서는 이산충돌감지, 연속충돌감지 기법과 충돌 감지 실행 효율성을 높이기 위한 기존 컬링 기법의 특성을 살펴보고자 한다.

2.1 이산 충돌감지

이산충돌감지 기법은 주어진 한 시점에 대상 객체간의 충돌여부를 판별하는 기법으로서 폴리곤 모델 혹은 스플라인(Spline) 모델에서의 충돌감지를 위하여 바운딩 볼륨 계층구조(BVH)를 기반으로 하는 충돌감지 기법들이 널리 사용되고 있다. 충돌감지 대상 객체의 형태적 특징에 따라 서로 다른 효율적인 충돌감지 기법들이 고안되었는데, 예를 들어, 볼록 다각형에 대한 충돌감지를 위하여 컨벡스 헐 트리(Convex Hull Tree)와 보로노이 마칭(Voronoi Marching) 알고리즘[9]을 결합한 방법이 소개되었다[10]. 이러한 이산충돌감지 기법은 많은 연구가 진행되어 크기가 방대한 모델의 경우에도 실시간 처리가 가능한 처리 효율성을 보이는 기법들이 소개되고 있다. 다만, 충돌감지가 이산적으로 이산시간 가운데 발생하는 충돌에 대해 감지가 불가능하여, 보다 세밀한 충돌감지를 위해서는 연속적인 충돌감지 방법의 적용이 요구된다.

2.2 연속 충돌감지

기존 연속 충돌감지 기법들은 특성에 따라 몇 가지 분류로 구분된다. 벡터를 쉽게 표현하고 수식을 통한 벡터 값을 간단히 얻기 위해 대수학의 행렬방정식을 이용한 Algebraic Equation-solving[11] 방법과, NC의 툴 작동 궤적과 로봇의 움직임 영역을 시뮬레이션하기 위한 목적으로 연구된 스위프트 볼륨[12]을 이용한 기법, 다른 기존 기법보다 적은 계산 비용으로 객체간 거리 계산 기반 충돌감지가 가능한 적응 이분[13] 기법 등이 있다. 이들 CCD 접근방법들의 대부분은 실시간 적용에는 무리가 있으며, 제한된 형태인 2차원 다면체 모델과 볼록다각형 또는 단순 대수적 모델에만 적용이 가능한 방법들이 일반적이다. 따라서 이런 접근방식들은 이산 충돌감지 알고리즘에 비해 일반적인 다각형 메쉬 모델에 응용하기에 부적절하다. 적응 이분기법을 기반으로 하는 알고리즘은 좋은 실시간 성능을 보이고 있다. 그러나 다면체 모델의 위상학적 정보나 연속충돌감지 계산에서 움직임 간섭 정보를 이용하지 않기 때문에 다면체 모델에 적용할 때 [14]보다 성능 저하 현상이 나타난다. 최근 컴퓨터

그래픽스와 가상현실에서의 증가하는 관절 모델의 요구 때문에 관절모델을 위한 효과적인 CCD 알고리즘들이 고안되었다[15]. 그러나 여기서 제안된 방법은 단지 실시간 적용을 위해 일반적인 2-manifold 메쉬 다면체로 이루어진 관절체를 다루는 것으로 일반적인 다각형 메쉬 모델에 전처리 과정 없이 적용하기에는 무리가 있다.

2.3 바운딩 볼륨 계층 구조 기반 컬링 기법

충돌감지는 세부적으로 계산하기에 고비용이 소요되어 비용을 낮추기 위해 사전 컬링에 관한 연구가 많이 진행되었고, 이를 강제모델에 적용한 대표적인 기법이 바운딩 볼륨 계층구조(BVH) 기반 방법이다. 객체를 계층 구조화하여 충돌가능 여부를 판단하고, 충돌가능성이 없는 세부 바운딩 볼륨내의 구성요소들은 세부 충돌 검사 대상에서 제외시킨다. 바운딩 볼륨 계층 구조를 구성하는 방법은 크게 공간기준 분할과 객체기준 분할로 구분된다.[2]. 객체 형태가 복잡하여 객체전체에 대한 하나의 바운딩 볼륨으로 충돌감지시 정확성이 떨어진다고 판단되면 이를 세부적으로 분리하여 계층구조화 함으로써 충돌감지시 필요한 부분만 선별할 수 있어 빠른 충돌감지가 가능하다. 이를 발전시켜 변형 객체에 적용하여 연속충돌감지가 가능하도록 동적 바운딩 볼륨 계층구조(Dynamic BVH)가 제안되기도 하였다[4]. 그러나, 바운딩 볼륨 계층구조 기반 방법들은 컬링 기법을 적용하기 전 간단하지 않은 전처리(Pre-processing) 단계를 수행하여야 하고, 특히, 변형객체의 충돌감지를 위하여 바운딩 볼륨 계층구조를 적용하는 경우, 변형모델의 형태가 변화함에 따라, 계층구조의 갱신을 위한 높은 계산비용을 감수하여야 한다.

2.4 가시성 테스트 기반 컬링

Govindaraju는 GPU의 패쇄검사를 이용한 가시성 테스트를 통하여, 객체 간 충돌가능한 삼각형 집합(PCS: Potential Colliding Set)을 추출하는 방법을 제안하였다[16]. 이 방법은 주요 시점을 중심으로 3차원 대상 객체가 투영된 2차원 이미지 공간상에서 대상 객체간의 교차에 있는지 여부를 판별하는 방법으로서, 충돌감지를 위한 복잡한 자료구조나 사전처리를 필요로 하지 않는 방법이다. 이미지 공간을 기반으로 하는 방법들은 정확한 충돌감지 결과를 얻기 보다, 근사값을 알려주는 방법으로서, 실제 충돌 삼각형을 포함한 충돌가능 삼각형의 집합을 얻기 위한 방법이다. 삼각형 단위의 이미지 공간 기반 방법은 카메라의 시선방향 선 상에 위치하는 삼각형은 이미지 공간에서 래스터라이즈가 되지 않기 때문에 교차 테스트를 수행할 수 없는 문제점이 있다.

3. 알고리즘 개요

본 연구에서는 기존의 이미지 공간 기반 컬링 방법이 카메라의 시선방향 선상에 위치하는 삼각형은 처리 할 수 없다는 문제점을 해결하고, 연속 시점에서의 충돌가능성을 효율적으로 감지하기 위하여 2단계로 구성된 프리즘 단위의 가시성 테스트 기반 컬링 기법을 고안하였다.

그림 1은 제안 컬링 기법의 처리 절차를 보여주고 있다. 연속 충돌감지 대상 객체모델이 입력되면, 이산시간 간격에 대해 매칭 삼각형을 이용하여 프리즘을 정의한다. 이때, 프리즘의 사각형 옆면을 삼각형으로 분할하여 8개의 삼각형의 집합으로 구성한다. 제안 프리즘 기반 컬링 기법은 2단계로 처리된다. 첫 번째 단계는 프리즘 단위의 가시성 테스트를 수행하고, 여기서 프리즘의 충돌가능 집합(PCS)이 정의되면 두 번째 단계에서, 분리축 테스트(SAT)를 이용하여 PCS 내의 모든 가능한 프리즘 쌍에 대하여 투영된 한 축에서의 겹침 여부를 판별한다. 이를 통하여 최적화된 충돌가능 프리즘의 쌍을 추출한다.

본 제안 기법은 복잡한 전처리 과정을 요구하지 않고, 입력 모델의 형태적 제약이 없는 장점을 가진다. 또한, 컬링의 기본 단위를 프리즘으로 사용함으로써 기존 이미지 공간 기반 컬링 기법 적용시 발생가능한 시선 방향 수직인 삼각형에 대한 겹침 판별 오류의 문제를 극복하였다.

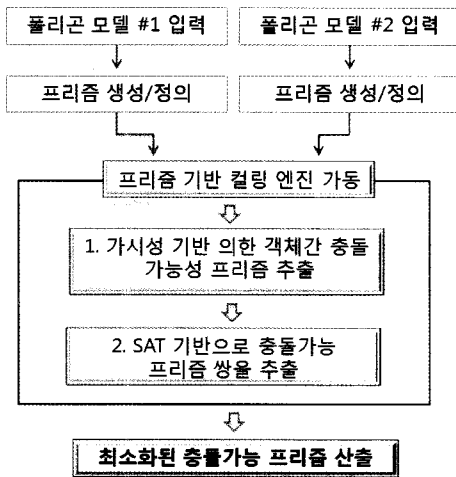


그림 1. 프리즘 기반 2단계 메쉬 컬링 절차도

4. 프리즘 기반 가시성 테스트

본 절에서는 제안 컬링 기법을 단계적으로 설명한다. 대상객체를 구성하는 각 삼각형에 대하여 일정 시간 간격에 대한 삼각형의 위치를 기반으로 시간변수 t ($0 \leq t \leq 1$)에 의해 프리즘을 정의하고, 프리즘 단위의 컬링을 수행한다.

4.1 프리즘 정의

이산시간($t=0, t=1$) 사이에 대응 삼각형을 같은 꼭지점끼리 연결하면 프리즘 모양을 그림 2 (a)와 같이 생성된다. 충돌감지 처리를 용이하게 하기위해 프리즘 구조를 삼각형으로 메쉬화 하는 작업이 필요하며, 프리즘의 사각평면에 대해 각각 삼각형으로 분할하여 총 8개의 삼각형의 집합으로 프리즘을 정의한다. 8개의 삼각형으로 구성된 프리즘의 형태는 그림 1 (b)와 같다.

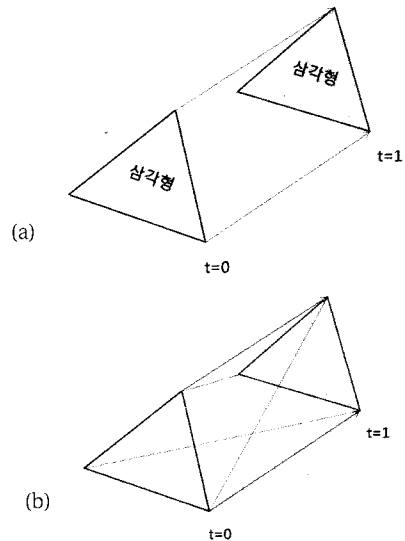


그림 2. 프리즘 정의. (a)이산 시간 $t=0$ 일 때와 $t=1$ 일 때 생성된 삼각형을 연결한 프리즘 모양, (b)8개의 삼각형의 집합으로 정의된 프리즘.

4.2 객체간 충돌가능 프리즘 추출

n 개의 객체 O_1, O_2, \dots, O_n 이 주어지고, 각 객체 O_i 는 m_i 개의 삼각형로 구성될 때, 4.1절에 따라 O_i 에 대하여 m_i 개의 구성 프리즘 P_k^i 가 정의 가능하고, P_k^i 가 [조건 1]을 만족하는 경우 P_k^i 는 충돌가능 프리즘의 집합에서 제외된다.

[조건 1] $O_{i-1}, O_{i-1}, O_i, O_{i+1}, \dots, O_n$

($1 \leq i \leq n$)의 구성 프리즘들과 P_k^i 가 서로 교차하지 않는다.

[조건 1]의 만족여부를 판별하기 위하여 가시성 테스트 모드에서, 2 스텝 렌더링을 수행한다. 즉, 첫번째 스텝에서 $O_1, \dots, O_{i-1}, O_i, O_{i+1}, \dots, O_n$ 의 순서로 각 구성 프리즘들을 렌더링하고, 각 프리즘이 다른 객체의 구성 프리즘에 의하여 가려지는지 않으면 전체 프리즘이 온전하게 가시화 되는지를 폐쇄검사

함수를 이용하여 검사한다. 깊이 버퍼의 내용을 지우고 두번째 스텝의 렌더링을 수행한다. 두 번째 스텝에서는 스텝 1의 렌더링 순서의 역순서 즉, $O_{n-1}, O_{i+1}, O_i, O_{i-1}, \dots, O_1$ 의 순으로 각 구성 프리즘들을 렌더링하고, 각 프리즘이 다른 객체의 구성 프리즘에 의하여 가려지는지 온전히 가시화되는 지를 검사한다. 한 구성 프리즘이 양방향으로 다른 프리즘에 의한 가림 현상 없이 온전히 가시화 되는 경우, 이 프리즘은 어느 구성 프리즘 과도 교차하지 않는 것으로 판단되어 충돌 가능성이 없는 프리즘으로 선별한다. 즉, 충돌가능 프리즘 집합에서 제외시킨다. 2 스텝의 렌더링에 의한 객체간 충돌가능 프리즘 집합 선별 알고리즘을 두 개의 객체 A, B의 입력으로 단순화 하여 표현한 것은 아래의 알고리즘 1과 같고, 프리즘 기반 알고리즘 적용 후 결과는 그림 3에서 보여주고 있다.

그림 3은 삼각형 단위와 제안 프리즘 단위 가시성 테스트 기반 컬링 결과를 수행 시간대 별로 비교하여 보여주고 있다. 그림 3의 결과 영상을 보면, 삼각형 단위의 컬링의 경우, t=1과 t=2의 사이에서 컵의 왼쪽 끝 부분과 손가락의 뒷면에서 충돌이 일어났음에도 불구하고, 충돌을 감지하지 못하고 있다. 반면, 연속 충돌감지를 위한 프리즘 단위의 컬링의 결과는 t=1에서 t=2와 t=1 시간대의 삼각형의 위치에 따라 정의된 프리즘에 의하여 손가락의 상단 부분과 뒤쪽 부분, 컵의 왼쪽 전체 영역(파란색 표시 부분)들이 충돌가능 영역으로 감지되고 있다.

알고리즘 1. 프리즘 단위의 가시성 테스트 기반 컬링

● First pass :

1. Clear the depth buffer (use orthographic projection)
2. Input object A and B
3. Define Prism of object A and B
4. For each object $O_i, i = A, B$,
 - Disable depth mask and set the depth function to GL_GEQUAL .
 - For each Prism P_i in O_i
 - Render P_i using an occlusion query
 - Enable the depth mask and set the depth function to GL_LEQUAL
 - For each Prism P_i in O_i
 - Render P_i
5. For each object $O_i, i = A, B$
 - For each Prism P_i in O_i
 - Test if is not visible with respect to the depth buffer. If it is visible, set a tag to note it as fully visible.
6. Clear the depth buffer (use orthographic projection)

● Second pass:

Same as First pass, except that the two "For each object $O_i, i = B, A$ ", in line 4 and 5.

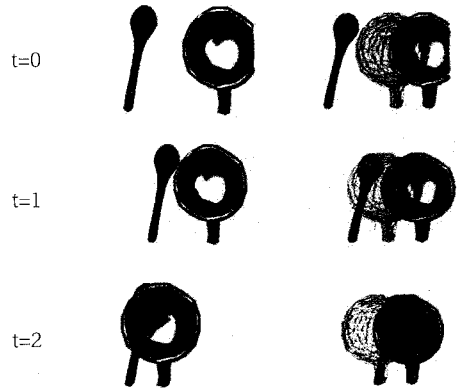


그림 3. 삼각형 단위(좌)와 프리즘 단위(우)의 가시성 테스트 기반 컬링 결과 비교. (붉은색 슬리드 모델 : T_m 현재시간의 모델, 와이어프레임모델 : T_{m+1} 시간의 모델)

4.3 프리즘 쌍 겹침 판별

4.3.1 가시성 테스트 기반 프리즘 쌍의 겹침 판별

4.2 절의 가시성 테스트 기반 컬링의 결과로 두 객체의 프리즘들 중에서 충돌가능 프리즘의 집합(PCS)을 추출하게 된다. 두 객체의 PCS를 각각 PCS_A 와 PCS_B 로 표현하고, PCS_A 와 PCS_B 에 각각, m 개와 n 개의 프리즘이 포함되어 있다면, PCS_A 와 PCS_B 에 의하여 $m * n$ 개의 프리즘의 쌍이 정의된다. 각각의 프리즘의 쌍에 대하여 복잡한 연속 충돌감지 처리 과정을 수행하기 전에, 특정 시선 방향에 대한 두 프리즘의 겹침 여부를 테스트함으로써, 협대역 컬링(Narrow band culling)을 수행할 수 있다. 두 프리즘의 겹침 여부를 간단히 판별하기 위한 방법으로 4.2절에 적용한 가시성 테스트를 한 쌍의 프리즘들을 대상으로 수행하는 방법과 주 관찰 축을 추출하고 이 축에 투영한 프리즘의 영역의 겹침 여부를 판별하는 방법으로 구현할 수 있다. 본 논문에서는 두 가지 기법을 모두 구현하여 그 효율성과 성능을 비교하고자 한다.

우선 가시성 테스트 기반 프리즘 쌍의 겹침여부를 판별하기 위하여 그림 3과 같이 가시성 테스트를 할 시선방향을 정의하였다. 객체 A를 구성하는 한 삼각형의 t=0에서와 t=1에서의 삼각형의 중점을 각각 C_a^0 와 C_a^1 이라고 하자. 이와 마찬가지로 객체 B를 구성하는 한 삼각형의 t=0에서와 t=1에서의 삼각형의 중점을 각각 C_b^0 와 C_b^1 이라고 하자. 같은 시간대의 삼각형의 중점을 연결한 두 선분 $\overline{C_a^0 C_b^0}$ 와

$\overline{C_a^0 C_b^1}$ 을 정의하고, 각 두 선분의 중점 C_{ab}^0 와 C_{ab}^1 을 식 (1)과 같이 구한다.

$$C_{ab}^0 = \frac{C_a^0 + C_b^0}{2}, C_{ab}^1 = \frac{C_a^1 + C_b^1}{2} \quad (1)$$

C_{ab}^0 와 C_{ab}^1 을 연결하는 벡터 $\overline{P_n} = C_{ab}^1 - C_{ab}^0$ 을 가시성 테스트를 위한 시선 방향으로 정한다. 정해진 시선 방향으로 고정하고, 4.2절에서 설명한 폐쇄검사를 이용한 가시성 테스트를 두 프리즘 즉 한 쌍의 프리즘에 적용하여 두 프리즘의 겹침 여부를 판별한다. 가시성 테스트 결과 겹침이 발생하지 않는 프리즘 쌍은 충돌 가능성이 없는 쌍으로서 PCS에서 제거한다.

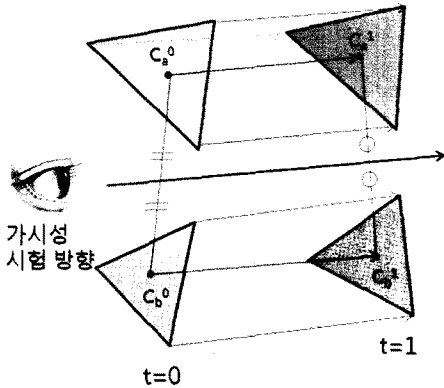


그림 4. 가시성 테스트 기반 프리즘 쌍의 겹침 판별

4.3.2 분리축 테스트(SAT) 기반 프리즘 쌍의 겹침 판별

4.3.1절의 가시성 테스트 기반 프리즘 쌍의 겹침 판별은 분리축 테스트 기반 방법으로 그 효율성을 높일 수 있다. 분리축 테스트 기반 방법에서 겹침 여부 판별의 정확성 및 효율성은 관찰축 즉, 분리축을 어떻게 정의하느냐, 그리고, 얼마나 많은 분리축에 대하여 겹침 테스트를 수행하느냐에 따라 달라진다. 본 논문에서는 효과적인 분리축 테스트를 위하여 두 프리즘의 영역을 반공간으로 분할하는 평면을 정의하고, 그 평면에 수직인 축을 추출하여 이를 분리축으로 정의한다. 정의된 하나의 분리축에 대하여 단일 분리축 테스트를 수행한다.

분리축 정의를 위한 상세 절차는 아래와 같다. 우선 가시성 테스트 기반 방법과 같이 같은 시간대의 삼각형의 중점을 연결한 선분의 중점인 C_{ab}^0 와 C_{ab}^1 을 식(1)에서 구한다. 그리고, C_{ab}^0 와 C_{ab}^1 을 연결하는 벡터 $\overline{P_n} = C_{ab}^1 - C_{ab}^0$ 을 구하고, 벡터 $\overline{P_n}$ 의 x, y, z 구성값이 식(2)와 같다고 가정한다.

$$\overline{P_n} = C_{ab}^1 - C_{ab}^0 = (P_{nx}, P_{ny}, P_{nz}) \quad (2)$$

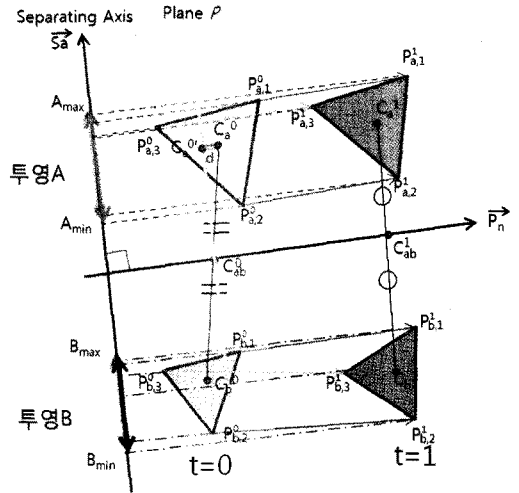


그림 5. 분리축(SA) 기반 프리즘 쌍의 겹침 판별

벡터 $\overline{P_n}$ 에 수직인 하나의 선분을 정의하기 위하여 우선, 벡터 $\overline{P_n}$ 에 수직이면서 $C_{ab}^0 = (x_0, y_0, z_0)$ 점을 포함하는 평면 P를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$P_{nx}(x - x_0) + P_{ny}(y - y_0) + P_{nz}(z - z_0) = 0 \quad (3)$$

$C_a^0 = (x, y, z)$ 이라고 하면, C_a^0 를 평면 P에 투영한 점 C_a^{0r} 는 식 (4)와 같이 정의된다. 여기서 d와 u는 식 (5)와 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$C_a^{0r} = C_a^0 - d \left(\frac{P_{nx}}{u}, \frac{P_{ny}}{u}, \frac{P_{nz}}{u} \right) \quad (4)$$

$$d = \frac{|P_{nx}x + P_{ny}y + P_{nz}z|}{\sqrt{P_{nx}^2 + P_{ny}^2 + P_{nz}^2}} \quad (5)$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{P_{nx}^2 + P_{ny}^2 + P_{nz}^2}} \quad (6)$$

분리축 테스트를 위한 분리축 \overrightarrow{Sa} 은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\overrightarrow{Sa} = C_{ab}^0 - C_a^{0r} \quad (7)$$

객체 A의 프리즘을 구성하는 6개의 정점 $P_{a,1}^0, P_{a,2}^0, P_{a,3}^0, P_{a,1}^1, P_{a,2}^1, P_{a,3}^1$ 와 객체 B의 프리즘을 구

성하는 6개의 정점 $P_{b,1}^0, P_{b,2}^0, P_{b,3}^0, P_{b,1}^1, P_{b,2}^1, P_{b,3}^1$ 을 분리 축 \vec{S}_a 에 투영하여 각 객체별 최대, 최소 투영값을 식(8)와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}
 A_{\max} &= \max(\vec{S}_a \cdot P_{a,1}^0, \vec{S}_a \cdot P_{a,2}^0, \vec{S}_a \cdot P_{a,3}^0, \\
 &\quad \vec{S}_a \cdot P_{a,1}^1, \vec{S}_a \cdot P_{a,2}^1, \vec{S}_a \cdot P_{a,3}^1) \quad (8) \\
 A_{\min} &= \min(\vec{S}_a \cdot P_{a,1}^0, \vec{S}_a \cdot P_{a,2}^0, \vec{S}_a \cdot P_{a,3}^0, \\
 &\quad \vec{S}_a \cdot P_{a,1}^1, \vec{S}_a \cdot P_{a,2}^1, \vec{S}_a \cdot P_{a,3}^1) \\
 B_{\max} &= \max(\vec{S}_a \cdot P_{b,1}^0, \vec{S}_a \cdot P_{b,2}^0, \vec{S}_a \cdot P_{b,3}^0, \\
 &\quad \vec{S}_a \cdot P_{b,1}^1, \vec{S}_a \cdot P_{b,2}^1, \vec{S}_a \cdot P_{b,3}^1) \\
 B_{\min} &= \min(\vec{S}_a \cdot P_{b,1}^0, \vec{S}_a \cdot P_{b,2}^0, \vec{S}_a \cdot P_{b,3}^0, \\
 &\quad \vec{S}_a \cdot P_{b,1}^1, \vec{S}_a \cdot P_{b,2}^1, \vec{S}_a \cdot P_{b,3}^1)
 \end{aligned}$$

각 객체에 대한 투영 최대, 최소값이 식(9)의 조건을 만족하는 경우, 두 프리즘은 분리되어 있는 경우로 판정하여 PCS로부터 해당 프리즘 쌍을 제거한다.

$$\text{separated if } A_{\max} < B_{\min} \text{ or } B_{\max} < A_{\min} \quad (9)$$

5. 실험 및 결과

제안 기법의 구현 및 실험은 인텔 요크필드 쿼드 2.5GHz CPU, DDR3 2GB RAM, nVIDIA사 GTX 9800+ 그래픽 보드가 탑재된 PC에서 수행되었다. GPU의 성능을

향상시키기 위해 SLI 기능인 그래픽 카드를 2개로 병렬 연결하여 사용하였다. 알고리즘은 윈도우즈 XP 운영체제에서 마이크로소프트사의 비주얼 스튜디오 6.0 환경에서 OpenGL 1.0을 사용하여 구현하였다.

실험을 위하여 3쌍의 강제모델에 대하여 충돌을 발생시키고, 충돌 상황에서 충돌가능 프리즘의 쌍을 추출하는 수행속도와 컬링비율을 측정하였다. 충돌 모델 종류는 컵과 스푼, 토끼(R)와 토끼(B), 용과 토끼로 모델을 구성하는 삼각형의 수는 컵 500개, 스푼 336개, 토끼 2,916개, 용 2,731개로 단순 모델에서 복잡한 모델까지 다양한 실험 표본을 선정하였다.

그림 6은 1단계 두 객체에 대한 프리즘 단위 가시성 기반 컬링으로 충돌가능 프리즘 집합을 추출하여, 모든 가능 프리즘의 쌍을 흰색 라인으로 연결한 모습과 2단계 SAT 기반 프리즘 쌍의 겹침 여부를 판별하여, 분리된 프리즘의 쌍을 PCS에서 제거하고, 충돌가능 프리즘의 쌍만을 흰색라인으로 연결한 모습을 비교하여 보여주고 있다. 2단계 컬링을 수행하기 전에는 서로 동떨어져 있는 프리즘의 쌍에 대해서도 세부 테스트를 위한 연결성이 지어짐을 보여주고 있고, 2단계 컬링의 결과 충돌가능성이 없는 다수의 프리즘의 쌍을 제거하고 있음을 가시적으로 확인할 수 있다. 그림 6의 2단계 컬링을 위하여 가시성 기반 방법을 적용한 결과와 SAT 기반 방법을 적용한 결과를 표 1에서 비교하고 있다. 컵과 스푼의 충돌 테스트 경우, 1단계 컬링의 결과 추출된 PCS에 속하는 프리즘에 의하여 1980 쌍의 프리즘이

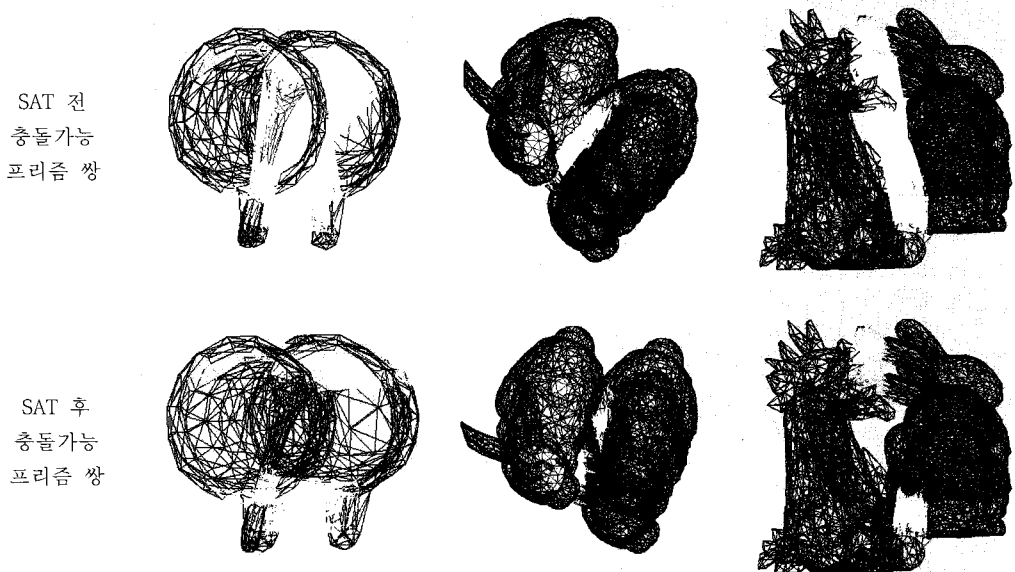


그림 6. 분리축 테스트 전후 충돌 가능 프리즘 쌍(흰색라인)의 비교.

표 1. 가시성 테스트 기법과 분리축 테스트 기법을 이용한 총돌 가능 프리즘 쌍 추출 성능 비교.

모델	삼각형수	1단계 결과 총돌가능 프리즘쌍의 수 (A)	가시성 기반 컬링			SAT기반 컬링		
			PCS Prism쌍의 수 (B)	수행속도 (ms)	컬링효과 (%) $(1-B/A)*100$	PCS Prism쌍의 수 (C)	수행속도 (ms)	컬링효과 (%) $(1-C/A)*100$
컵	500	1,980	341	346.29	82.78	894	3.35	54.85
스푼	336							
토끼(R)	2,916	14,640	422	2,811.61	97.12	1,628	5.71	88.88
토끼(B)	2,916							
토끼	2,916	522	57	152.44	89.08	148	1.21	71.65
용	2,731							

표 2. 각 모델에 대한 최종 컬링 결과.

단계	모델	삼각형수	모든 프리즘쌍의 수(A)	1단계 컬링			2단계 컬링 (SAT기반)		
				총돌가능 Prism 수 (B,C)	수행속도 (ms)	컬링효과 (%) $(1 - \frac{B \times C}{A}) \times 100$	총돌가능 Prism 쌍의 수 (D)	수행속도 (ms)	컬링효과 (%) $(1 - \frac{D}{A}) \times 100$
T0	컵	500	168,000	33	12.7	98.82	894	3.35	99.47
	스푼	336		60					
T1	컵	500	168,000	76	12.9	93.89	1,943	19.51	98.84
	스푼	336		135					
T2	컵	500	168,000	89	17.8	88.24	2,532	40.02	98.49
	스푼	336		222					
T0	토끼(R)	2,916	8,503,056	122	79.3	99.83	1,628	5.71	99.98
	토끼(B)	2,916		120					
T1	토끼(R)	2,916	8,503,056	271	84.5	99.32	3,184	24.59	99.96
	토끼(B)	2,916		213					
T2	토끼(R)	2,916	8,503,056	126	84.4	99.92	895	2.30	99.99
	토끼(B)	2,916		53					
T0	토끼	2,916	7,963,596	29	57.89	99.99	148	1.21	99.99
	용	2,731		18					
T1	토끼	2,916	7,963,596	144	57.24	99.88	1,516	3.56	99.98
	용	2,731		67					
T2	토끼	2,916	7,963,596	172	59.57	99.83	2,009	5.6	99.97
	용	2,731		81					

총돌가능 프리즘 쌍으로 검출되었고, 각각의 프리즘 쌍에 대하여 가시성 기반 컬링을 적용한 경우, 1단계 컬링 결과에 기준한 컬링효과는 82.78%에 달했으나, 수행속도는 346.29 msec 로 실시간 처리가 불가능한 시간이 걸렸다. 반면, SAT 기반 컬링 기법을 적용한 경우, 컬링 효과는 1단계 컬링 결과 기준 54.85 %의 컬링 효과를 나타내었고, 수행 속도는 3.35 msec으로 수행 효율성이 높았다. 다른

벤치마크 모델간 총돌 실험에서도 SAT 기반한 프리즘 쌍의 검침 테스트는 컬링 비율은 가시성 기반 컬링 기법에 비해 2-3배 떨어졌지만, 수행성능면에서는 100배에서 560배 빠른 성능을 보여주었다. 가시성 기반 컬링 기법은 최적화된 총돌가능 프리즘 쌍의 집합을 높은 컬링비율로 검출하였으나, 최대 560배 높은 수행시간을 요구하여 비용대 효과 측면에서 분리축 테스트 기반 컬링 방법이 효율적임을 알

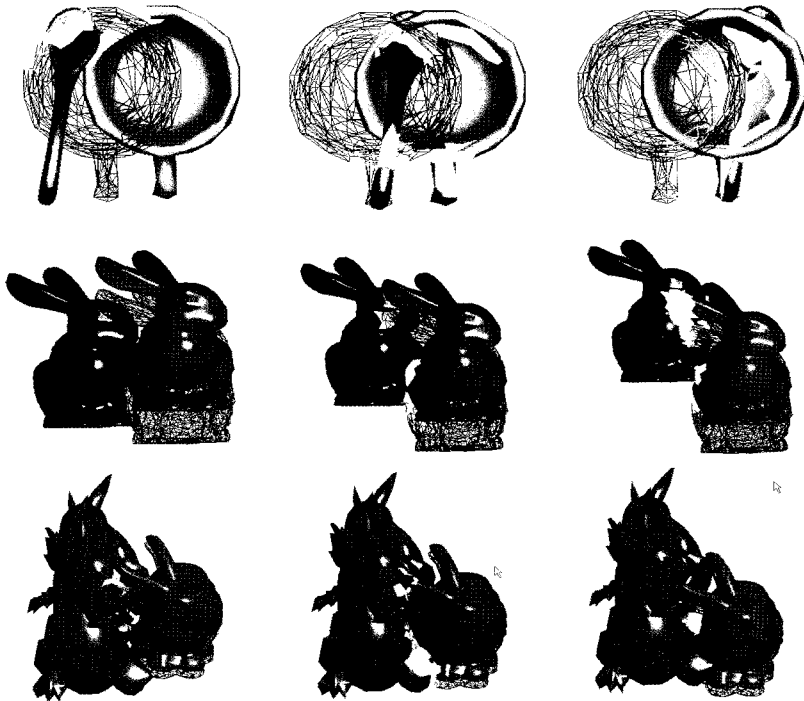


그림 7. 킬링 결과 추출된 충돌가능 영역(Cyan 색 영역). 붉은 색 겹과 붉은 색 토끼 모델은 시간대 별로 이동하는 모델로서 솔리드 모델과 와이어 프레임 모델로 연속된 모델을 표현. (붉은색 솔리드 모델 : T_m 현재시간의 모델, 와이어프레임모델 : T_{m+1} 시간의 모델).

수 있었다.

표 2는 1단계와 2단계 각각의 킬링 효과를 각 시간대별 충돌 모델에 대하여 분석하여 보여주고 있다. $T=0$ 시간대에서 토끼와 용 모델의 충돌 테스트의 경우, 7,963,596 쌍의 프리즘 쌍을 테스트 하여야 하나 1단계와 2단계의 킬링의 결과 148쌍의 프리즘에 대해서만 충돌가능 프리즘 쌍으로 추출하였다. 이를 위한 수행시간은 59.1 msec이 걸렸고, 충돌가능 영역으로 추출한 결과 영역은 그림 7의 최하단의 좌측 영상에서 보여주고 있다. 표 2의 결과와 같이 제안 기법은 높은 킬링비율을 보여주었다. 그림 7은 시간대별로 각 모델쌍에 대하여 1단계와 2단계 킬링 결과 추출된 최종 충돌가능 영역을 청록(cyan) 색상으로 보여주고 있다. 그림 7을 통하여 킬링의 결과 추출된 충돌가능 영역은 최적화 영역으로 검출되었음을 가시적으로 확인할 수 있다. 그림 7은 충돌이 감지된 후의 물리적 반응 모델은 적용하지 않은 상태에서 모델의 위치 변화에 따른 프리즘 단위의 킬링 결과물과 나타나고 있다.

표 2의 1단계 가시성 테스트 기반 킬링의 수행시간을 살펴보면, 두 객체를 위해 폐쇄검사를 수행할 프리즘의 개수가 많아질수록 수행시간이 높아지는데, 프리즘 하나당 0.0154 msec 정도의 수행시간이 요구됨을 알 수 있다. 그러므로, 예를 들어 2단계 정도의 삼각형으로 구성된 두 객체간 연속충돌 감지를 위하여 광대역 킬링절차 없이 본 제안 기법만을 사용한다면, 1단계의 킬링을 위한 처리시간으로 약 600 msec 정도가 요구된다. 그러므로, 수 만개 이상의 삼각형으로 구성된 대형 모델의 경우에는 깊이가 깊지 않은 광대역 킬링을 위한 바운딩 볼륨 계층구조(BVH)를 구축하여 1단계 광대역 킬링을 수행하고, 리프 노드의 세부 바운딩 볼륨간의 연속 충돌 감지를 위하여 본 제안 기법의 킬링 단계를 수행한다면 높은 효율성을 보여줄 것으로 예상된다.

본 논문에서는 객체들이 단위시간 내에서 선형 움직임을 보이는 것으로 가정하고 프리즘을 정의하고 있다. 단위시간은 길지 않은 시간이므로 복잡한 궤도에 따른 움직임이라 할지라도 단위시간 선형움직임으로 근사한

것이다. 그러나 단위시간 내에 객체가 비선형 궤도를 따라 크게 움직인다면, 비선형 궤도를 따라 정의되는 스윙프트 볼륨(swift volume)을 포함하는 프리즘 볼륨을 정의한 후 본 논문에서 제안하는 킬링 기법을 적용하여야 할 것이다.

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 연속충돌감지에 효율적으로 적용할 수 있는 2단계로 구성된 프리즘 단위 킬링 방법을 제시하였다. 강체 모델에 대해 상호작용적으로 사용하는데 요구되는 시간 이내로 처리되어 실시간 연속 충돌감지 기법으로 사용이 가능함을 알 수 있다. 제안 기법은 입력 모델의 형태적 제약점이 없고, 복잡하고 무거운 전처리 과정을 필요로 하지 않는 방법으로서 킬링성능이 높고, 수행 속도가 빠른 방법으로 분석되고 있다. 또한, 제안기법은 1단계 가시성테스트 기반 킬링 단계의 폐쇄감사의 단위를 조정하게 된다면, 다른 구성요소의 변경 없이 쉽게 변경객체의 연속 자체충돌감지를 위한 킬링으로 확장할 수 있다.

향후 연구과제로 복잡도가 높은 모델을 처리하기 위하여, 광대역 킬링에 기존 BVH 기법을 적용하고, 협대역 킬링을 위하여 본 논문에서 제안하는 2단계 킬링 기법을 적용하여 충돌감지의 효율성을 높이고자 한다. 또한, 본 제안 기법의 1단계 킬링 단계에서 자체 충돌 가능 프리즘 집합을 추출할 수 있도록 보완하여, 변형모델에 대한 연속 자체충돌감지를 수행하고, 기존 변형객체에 대한 연속충돌감지 기법[17]과 성능비교를 수행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2006-331-D00524).

참고 문헌

- [1] Yoo-Joo Choi, Young J. Kim and Myung-Hee Kim, "self-CD : Interactive Self-collision Detection for Deformable Body Simulation Using GPUs," *AsiaSim*, pp. 187-196, 2005.
- [2] Gottschalk, S., Lin, M. C., and Manocha, D. "OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection," *In Proc. of SIGGRAPH*, pp. 171-180, 1996.
- [3] Redon, S., Kim, Y. J., Lin, M. C., and Manocha, D., "Interactive and continuous collision detection for avatars in virtual environments," *In Proc. of IEEE Virtual Reality*, 2004.
- [4] Larsson T. and Akenine-Möller T., "A dynamic bounding volume hierarchy for generalized collision detection," *Computers and Graphics*, vol. 30, no. 3, pp. 451-460, 2006.

- [5] Min Tang and Young J. Kim and Dinesh Manocha, "C2A: Controlled Conservative Advancement for Continuous Collision Detection of Polygonal Models," *In Proc. of International Conference on Robotics and Automation, Japan*, 2009.
- [6] Mirtich, B. V., "Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems," *PhD thesis, University of California, Berkeley*, 1996.
- [7] Barequet G., and Har-Peled S., "Efficiently approximating the minimum-volume bounding box of a point set in three dimensions," *J. Algorithms* 38, pp. 91-109, 2001.
- [8] Teschner, M., Kimmere, S., Heidelberger, B., Zachmann, G., Raghupathi, L., Fuhrmann, A., Cani, M.-P., Faure, F., Magnenat-Thalmann, N., Strasser, W., and Volino, P., "Collision detection for deformable objects," *Computer Graphics Forum* 19, pp. 61-81, 2005.
- [9] Ehmann S., and Lin M. C. "Accelerated proximity queries between convex polyhedra using multi-level Voronoi marching," *In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2101-2106, 2000.
- [10] Ehmann, S., and Lin, M. C., "Accurate and fast proximity queries between polyhedra using convex surface decomposition," *Computer Graphics Forum (In Proc. of Eurographics 2001)* vol. 20, no. 3, pp. 500-510, 2001
- [11] Redon, S., Keddar, A., and Coquillart, S., "An algebraic solution to the problem of collision detection for rigid polyhedral objects," *In Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, 2000.
- [12] Abdel-Malek, K., Blackmore, D., and JOY, K. "Swept volumes: foundations, perspectives, and applications," *International Journal of Shape Modeling*, 2000.
- [13] Schwarzer, F., Saha, M., and Latombe, J.-C., "Exact collision checking of robot paths," *In Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, 2002.
- [14] Zhang, X. Y., Lee, M. K., and KIM, Y. J., "Interactive continuous collision detection for rigid non-convex polyhedra," *The Visual Computer (In Proc. of Pacific Graphics 2006)* 22, pp. 9-11, 2006.
- [15] Zhang, X. Y., Stephane Redon, Lee, M. K., and KIM, Y. J., "Continuous collision detection for articulated models using Taylor models and temporal culling," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [16] N.K. Govindaraju, M. C. Lin and D. Manocha, "Fast self-collision culling in general environment using graphics processors," *In Technical Report TR03-044 of University of North Carolina at Chapel Hill*, 2003.
- [17] Min Tang, Sean Curtis, Sung-Eui Yoon, and Dinesh Manocha, "Interactive Continuous Collision Detection between Deformable Models using Connectivity-Based Culling," *ACM Symp. on Solid and Physical Modeling*, p. 25-36, 2008.

〈저자소개〉



우병광

- 1988년 경북대학교 전자공학과 (학사)
- 1994년 경북대학교 경영정보론 (경영학석사)
- 1988년 ~ 1989년 LG전자 설계실 (기사)
- 1990년 ~ 2006년 기술품질원 선임연구원
- 2006년 ~ 현재 서울벤처정보대학원대학교 컴퓨터응용기술학과 박사과정
- <관심분야> 컴퓨터 그래픽스, GPU, CAD 등



유효선

- 2002년 이화여자대학교 컴퓨터학과 (학사)
- 2004년 이화여자대학교 컴퓨터학과 (석사)
- 2007년 ~ 현재 서울벤처정보대학원대학교 VCAR 연구실 연구원
- <관심분야> 컴퓨터비전, 가상현실 등



최유주

- 1989년 이화여자대학교 전자계산학과 (이학사)
- 1991년 이화여자대학교 전자계산학과 (이학석사)
- 2005년 이화여자대학교 컴퓨터학과 (공학박사)
- 1991년 ~ 1993년 한국컴퓨터주식회사 기술연구소 주임연구원
- 1994년 ~ 1999년 포스데이터주식회사 기술연구소 주임연구원
- 2005년 ~ 현재 서울벤처정보대학원대학교 컴퓨터응용기술학과 조교수
- <관심분야> 컴퓨터 그래픽스, 가상현실, HCI, 컴퓨터비전, 의료영상처리 등