

아이폰 5 기반의 실시간 3D 변형 물체 모델링에 관한 연구

전재홍*, 이승현**, 홍민***

요약

최근 보다 빠른 처리 속도를 가지는 스마트 디바이스의 하드웨어 기술 발전에 따라 다양한 어플리케이션들에서 활용 가능한 실시간 3D 변형 물체의 표현에 대한 관심이 증대되고 있다. 본 연구는 최신 스마트 디바이스 중 하나인 아이폰 5에서 보다 안정적이고 빠른 다이내믹 시뮬레이션을 구현하기 위한 방법을 제시하기 위해, 다양한 3D 변형 물체들을 대상으로 실시간으로 처리가 가능한 변형 물체의 수와 변형 물체의 복잡도에 대한 분석을 실시하였다. 기존의 물리 기반 FFD-AABB 알고리즘에 빠른 충돌 감지 및 해결을 위해 3D 변형 물체의 형태 분석을 바탕으로 한 2단계의 충돌 구 검사 방법을 적용하였다. 또한 구현된 알고리즘의 성능 평가를 위해 다양한 형태의 3D 물체들을 일정 높이에서 바닥으로 자유 낙하하는 실험을 시뮬레이션으로 수행하였다. 따라서 본 논문은 빠른 충돌 감지를 위한 물체의 형태를 고려한 2단계 충돌 구 모델링 방법과 아이폰 5에서 실시간으로 시뮬레이션이 가능한 3D 변형 물체 모델링에 대한 가이드라인을 제시하였다.

A Study on Modeling of Real-time 3D Deformable Object with iPhone 5

Jae-Hong Jeon*, Seung-Hyun Lee**, Min Hong***

ABSTRACT

Since the smart device hardware related technology has been rapidly developed and it can provide fast processing speed recently, the interest of real-time representation for 3D deformable objects has been focused in various fields of developing applications for smart device. To present the method for implementation of robust and fast dynamic simulations based on iPhone 5, this paper analysis the possible representation number of deformable objects and complexity of objects which can be computed in real-time by test of various 3D deformable objects. The implemented physically-based FFD-AABB algorithm utilized the 2-level bounding sphere based approach provides fast collision detection and handling using the shape analysis of 3D deformable objects. In addition, to evaluate the performance of implemented algorithm we perform the free falling simulation test from the predefined height with various shapes of 3D deformable objects. Therefore, this paper presents the 2-level bounding sphere based modeling of objects using the shape analysis for fast collision detection and provides the guideline of 3D deformable object modeling for real-time simulation with iPhone 5.

Key Words : Smart Device, 3D Free Form Deformation, Collision Detection, Deformable Object Simulation, iPhone 5

* 순천향대학교 컴퓨터학과 (✉ jjhong@sch.ac.kr)

** 홍익대학교 건축공학부

*** 순천향대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

· 제1저자(First Author) : 전재홍 · 교신저자(Corresponding Author) : 홍민

· 접수일(2013년 9월 20일), 수정일(1차 : 2013년 10월 4일), 게재확정일(2013년 10월 10일)

I. 서 론

최근 스마트 디바이스는 전 세계를 흔들 정도로 아주 빠르게 발전하고 있으며, 시장규모 또한 매우 급격히 팽창하고 있는 추세이다. 정보통신진흥원의 2013년 8월 통계자료에 따르면 국내 스마트 디바이스 보급률은 우리나라 가정의 61%를 넘는 것으로 조사되고 있으며, 2013년 7월 가입자 수가 이미 3천 5백만 명이 넘는 것으로 발표 되었다[1, 2]. 또한 2013년 3월 한국문화 콘텐츠 진흥원의 “2012 스마트콘텐츠 시장조사” 발표에 따르면 2013년 상반기 현재 국내 스마트 콘텐츠 시장 규모는 약 2조 2천억 원으로 2012년 1조 9천억 원에 비하여 약 22% 증가한 상황이며, 2015년에는 3조 5천억 원에 달할 것으로 예상되고 있다[3].

이와 더불어, 스마트 디바이스의 하드웨어 기술은 2009년 애플의 1 core CPU를 시작으로 최근에는 삼성의 4 core CPU까지 빠르게 발전하고 있는 추세이다. 이러한 하드웨어 기술의 발전은 모바일 게임 및 애플리케이션 시장의 확장과 맞물려 기존의 PC와 콘솔 플랫폼 기반의 높은 사양의 콘텐츠들이 사용에 비교적 시간적, 공간적인 제약이 적은 스마트 디바이스 환경으로 빠르게 이동하고 있는 상황이다.

이러한 환경 변화에 따라서, 다양한 애플리케이션에 적용 가능한 3D 변형 물체의 실시간 표현에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 스마트 디바이스들의 성능이 크게 향상되었다고는 하지만, 아직 일반적인 PC에 비해서는 제한적인 성능을 제공하기 때문에 기존의 PC기반 최신 3D 변형 물체 시뮬레이션 방법들을 적용하는 데 한계가 있다. 따라서 최신 스마트 디바이스의 성능을 고려한 실시간 3D 변형 물체의 모델링과 시뮬레이션 방법에 대한 연구가 필요한 상황이다.

II. 관련 연구

기존의 물리기반 다이내믹 시뮬레이션은 지속적인 컴퓨터 시뮬레이션 관련 기술 개발로 인해 안정성과 속도 향상 측면에서 많은 기술적 발전을 이루어왔다. 특히 3D 변형 물체에 외/내부적인 힘이 가해졌을 경우에 대해서 정확하게 변형을 표현하기 위한 변형 물체 모델링 방법에 대한 연구는 그동안 꾸준히 진행되어 왔다. 이와 관련하여 유한 요소 방법(Finite element method)은 변형 물체에 대한 예측이 다른 방법들에 비해 상대적으로 정확하지만 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 시간과 상관없이 정확한 예측이 필요한 건축물 설계, 자동차 충돌 예측 등에 주로 사용되어 왔다. 이에 비해 비교적 계산은 빠르나 정확성이 떨어지는 질량-스프링 방법(Mass-spring method)은 주로 실시간 어플리케이션들에 적용되고 있다. 또한 정확성은 조금 떨어지지만 두 방법의 장단점을 보완한 경계 요소 방법(Boundary element method)과 유한 부피 방법(Finite volume method)등이 3D 변형 물체의 시뮬레이션 모델링을 위해서 적용되고 있으며, 물리적인 기반을 가지고 있지 않으나 수행 속도가 빠른 무망 변형 방법(Meshless deformation method)[4, 5] 역시 널리 사용되어오고 있다.

3D 변형 물체 시뮬레이션을 위한 Numerical Integration 방법에 대한 연구들은 대부분의 경우 시스템의 안정을 위해서 상대적으로 계산이 빠른 명시적 적분법(Explicit integration) 대신에 묵시적 적분법(Implicit integration)[6, 7]을 적용 하여 왔다. 기존의 3D 변형 물체 시뮬레이션들은 컴퓨터 게임이나 애니메이션 등에서 좀 더 현실적인 물리 현상들을 재현하기 위해 사용되어 왔고, 광고나 영화 등에서 인체의 대부분을 덮고 있는 옷 시뮬레이션[8, 9, 10]과 3D 변형 물체들의 충돌 시뮬레이션[11, 12, 13], 가상현실을 이용한 의료 수술 시뮬레이션 [14]을 통해 의사들이 실제 상황과 같이 수술을 연습하거나, 비행기나 자동차 조종 훈련, 폐쇄 공포증이나 고소 공포증의 치료를 위한 훈련 등과 같은 다양한 분야에 적용되어 왔다.

그러나 기존의 대부분의 연구들은 PC 기반의 다이나믹 시뮬레이션 방법으로 연산 능력이 현저하게 떨어지는 스마트 디바이스에서는 최근 게임 애플리케이션으로 크게 성공한 ‘앵글리 버드’의 예에서와 같이 아주 간단한 2D 기반의 기술들만이 주로 사용되고 있다.

III. 스마트 디바이스를 위한 실시간 3D 변형 물체 시뮬레이션 연구

일반적으로 스마트 디바이스는 제한된 연산 능력과 화면 크기를 가지고 있기 때문에 PC 기반의 3D 변형 물체 시뮬레이션 방법들의 목표인 아주 정교하고 정확한 변형 물체의 움직임과 변형에 대한 결과를 표현하지 않는다. 그 대신 다양한 게임 및 어플리케이션에 실용적으로 적용하기 위한 실시간 시뮬레이션 속도 제공이 최우선의 목표이다. 따라서 현재의 스마트 디바이스 성능을 고려한 최적화된 알고리즘을 통해서 그럴듯한 3D 변형 물체의 움직임과 변형 결과를 실시간으로 제공하는 방법이 아주 중요하다.

3.1 3D 변형 물체 모델링

스마트 디바이스에서 실시간으로 3D 변형 물체에 대한 움직임과 변형을 예측하기 위해서는 상대적으로 많은 연산 시간을 요구하는 유한 요소 방법, 경계 요소 방법, 유한 부피 방법은 적합하지 않다. 따라서 상대적으로 속도가 빠른 질량-스프링 방법이 적합하나, 대부분의 3D 변형 물체는 부피가 있기 때문에 외/내부에서 힘이 가해질 때 변형체가 쉽게 찌그러지는 단점이 발생한다. 이를 방지하기 위해 수학적 연산을 통한 부피 유지 방법을 적용하거나, 변형체 내부에 스프링을 설치하는 방법이 있으나 변형 물체에 적합한 스프링

을 설계하거나 부피를 유지하는 방법은 쉽지 않을 뿐만 아니라 추가적인 연산을 필요로 한다.

따라서 본 연구에서는 물리 기반이고 빠르면서도 간단하게 3D 변형 물체의 표면 정보만으로 물체의 부피 유지뿐만 아니라 움직임과 변형을 표현할 수 있는 FFD-AABB (Free Form Deformation - Axis-Aligned Bounding Box) 모델링 방법을 적용하여 3D 변형 물체를 구현하였다. 일반적인 FFD 방법[15]은 스프링으로 연결된 제어격자의 제어점에 작용하는 힘을 이용하여 물체의 모양을 변형하는 방법으로 정교한 물리기반의 시뮬레이션 방법은 아니지만, 빠르게 물체의 변형을 계산할 수 있는 장점이 있어 모바일 디바이스 기반의 3D 변형 물체 시뮬레이션에 적합한 방법이다. FFD 방법은 식 1을 적용하여 변형 물체 노드의 변화된 위치인 (s, t, u) 를 계산하며 식 2를 이용하여 변형 물체 노드의 최종 변화 위치인 p' 을 구한다. 이는 물체의 이전 노드 위치인 $p = (x, y, z)$ 에서 노드를 포함하고 있는 FFD Grid의 중심 위치인 $c_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 값의 차를 이용하여 계산한다.

$$s = (x - x_0), t = (y - y_0), u = (z - z_0) \quad (1)$$

위에서 계산된 c_0 의 값과 (s, t, u) 의 값을 식 2에 대입하여 변형 물체 노드의 최종 위치인 p' 을 구하며, (s, t, u) 의 값은 linear Bernstein 방법을 통하여 식 2에 사용된다.

$$p' = \sum_{j=0}^7 B_j(s) B_j(t) B_j(u) C_j' \quad (2)$$

FFD-AABB 방법[16]은 <그림 1>과 같이 기존의 FFD 방법에 빠른 충돌을 처리하기 위해서 AABB를 적용하여 Grid를 3D 변형 물체의 표면에 빈 공간을 밀착시켜서 효과적으로 충돌을 감지하는 방법이다.

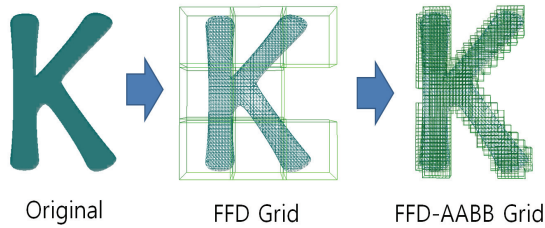


그림 1. FFD-AABB 생성 과정
Fig. 1. FFD-AABB Building Process

또한 스마트 디바이스에서 실시간으로 3D 변형 물체를 성공적으로 시물레이션하기 위해서는 변형 물체를 간결하면서도 물체의 형태를 잘 표현하고 변형 특성을 나타낼 수 있도록 기하학적 모델링을 해야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 아이폰 5에서 실시간으로 처리 가능한 모델링 한계(3D 물체의 최대 노드와 에지의 수)와 표현 가능 물체 수에 대한 실험을 수행하였다.

3.2 Numerical Integration

보통의 경우 3D 변형 물체의 다음 상태를 예측하기 위한 Numerical Integration은 안정적인 시물레이션 시스템을 유지하기 위해 묵시적 적분법(Implicit Integration)을 많이 사용하고 있으나, 스마트 디바이스에서는 묵시적 적분법에 비해서 계산이 빠른 명시적 적분법(Explicit Integration) 중에 Euler Integration이나 Verlet Integration 방법을 적용하고 안정적인 시물레이션 시간 간격을 적용하는 방법이 적합하다. 따라서 본 연구에서는 Euler Integration 방법을 적용하여 PC에 비하여 연산능력이 부족한 스마트 디바이스에서 빠르고 안정적인 시물레이션을 수행할 수 있도록 구현하였다.

3.3 충돌 감지 및 해결

3D 변형 물체 시물레이션에 있어서 충돌 감지와 충돌에 대한 해결이 정확하지 않을 경우 현실 세계에서

는 발생하지 않는 물체들의 겹침 현상이 발생하기 때문에 이러한 시물레이션 결과는 전혀 현실적이지 않게 된다. 따라서 복잡한 변형 물체가 포함된 다이내믹 시물레이션에서 충돌 감지와 해결에 있어서 계산 속도를 향상시키고 정확성을 높이기 위한 연구는 아주 중요한 분야이다. 일반적으로 정교한 충돌 감지를 위해서는 기본 단위(노드-에지) 중심의 충돌 검사가 필요하며, 이는 다이내믹 시물레이션에서 가장 연산 비용이 많이 사용되는 단계이다. 그러나 스마트 디바이스에서는 화면의 크기가 작고 컴퓨팅 성능이 제한되기 때문에, 정확한 충돌 감지 및 해결보다는 적정한 수준에서 충돌을 빠르게 찾아내고 해결하는 작업이 더욱 중요하다.

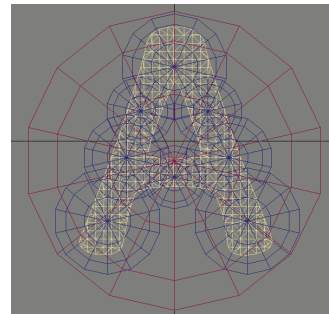
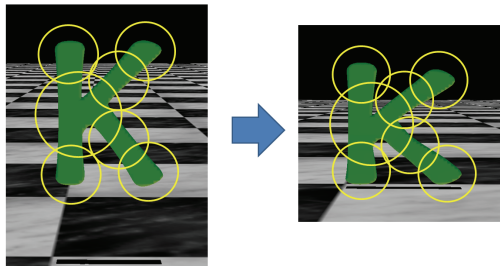


그림 2. 변형 물체의 형태적 특성을 고려한 2단계 Bounding Sphere 충돌 검사
Fig. 2. 2-level bounding sphere based collision detection using shape of deformable object

따라서 본 연구에서는 기존의 FFD-AABB 방법에 빠른 충돌 검사 및 처리를 위해 변형 물체들의 형태적 특성을 고려하여 2단계 Bounding Sphere 검사 방법을 적용하였다. <그림 2>와 같이 먼저 변형 물체의 외형 전체를 1단계 경계 구(빨강색)를 이용하여 감싼다. 추후 이 경계 구가 충돌된 경우에만 소수의 구로 구성된 2단계 경계 구(파란색)를 이용하여 충돌 검사를 실시한 후, 충돌로 감지된 2단계 경계 구 영역에 해당되는 부분만 정교한 충돌 검사를 진행하도록 함으로써 충돌 검사에 소모되는 시간을 최소화하였다. 또한 검출

된 2단계 경계 구 영역에 대해서도 연산 속도가 빠른 공간 해싱 방법[17]을 적용하여 충돌 가능성이 있는 노드들을 찾아낸 후, 이 노드들에 대해서만 삼각형-노드 기반의 충돌 검사를 수행하였다. 해당 방법으로 충돌 검사 시간을 단축시키는 결과를 얻었다.

본 논문을 위한 실험에서 사용된 대부분의 변형 물체들은 비교적 복잡한 굴곡과 파인 모양을 많이 지니는 오목한 모양과 볼록 모양으로 구성되어 있다. 오목한 모양의 물체들은 다른 물체들에 비하여 비교적 더욱 세밀한 충돌검사를 필요로 한다. 오목한 모양들은 물체의 다른 부분 충돌 시에 그 힘에 의해서 서로 충돌이 발생할 수 있기 때문에 물체를 모델링할 때 그 형태를 충분히 고려하여 경계 구를 설계하여야 한다. 따라서 오목한 모양의 변형 물체들의 경계 구를 생성할 때 물체의 모양에 따라서 최대한 경계 구들이 겹치지 않으면서 물체의 정점들을 최대한 포함 할 수 있도록 모델링해야 한다.



바닥과 충돌 하기 전 bounding spheres 바닥과 충돌 후 위치가 변한 bounding spheres
 그림 3. 물체의 움직임에 따른 2단계 경계 구의 위치 변화

Fig. 3. Transition of 2-level bounding spheres according to the movement of deformable object

구현된 방법은 물체의 위치 정보(노드, 에지)에 대한 데이터 파일과 경계 구의 위치 정보에 대한 데이터 파일을 읽어서 시뮬레이션에 이용한다. 변형 물체의 정보가 먼저 로드된 후 물체의 정점 데이터를 이용하여 1단계 경계 구를 생성하며, 이후 1단계 경계 구 데

이터 파일을 참조하여 물체의 2단계 경계 구를 생성한다. 2단계 경계 구는 처음 생성 될 때 1단계 경계 구의 중심과 가까운 정점을 기준으로 생성되기 때문에, 외부의 충돌이나 힘에 의해서 물체의 정점의 위치가 변하면 충돌 구의 중심 위치 역시 같이 변하게 된다. 식 3은 1단계 경계 구의 중심 위치인 c 를 구하는 방법을 보여주고 있다. 1단계 경계 구의 중심 위치 계산은 전체 정점의 합을 노드의 개수로 나누어서 구한다.

$$c = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{n-1} (x_k, y_k, z_k) \quad (3)$$

<그림 3>은 알파벳 K의 변형 물체가 바닥과 충돌하여 물체의 모양 변화에 따라 정점의 위치가 변할 때 효과적으로 2단계 경계 구의 위치가 변경되는 모습을 보여주고 있다.

IV. 실험 및 결과 분석

본 논문은 스마트 디바이스에서 구현 가능한 3D 변형 물체 시뮬레이션의 한계를 분석하기 위해서, 다양한 물체들을 대상으로 실시간으로 처리가 가능한 물체의 수와 변형 물체의 복잡도에 대한 분석을 최신 스마트 디바이스인 아이폰 5기반으로 실시하였다. 아이폰 5는 Apple A6의 시스템 칩셋을 기본으로 1,300Mhz의 동작 속도를 지원하는 두 개의 코어로 구성된 CPU와 그래픽 처리를 위한 SGX543MP3 칩셋으로 구성되어 있으며, GPU는 325Mhz속도를 제공하는 3개의 코어로 구성되어 있어, 다른 스마트 디바이스에 비하여 비교적 높은 성능으로 그래픽 효과를 표현할 수 있으며 2D와 3D 표현이 가능하도록 OpenGL|ES 1.X, 버전과 2.0 버전의 3D 그래픽 라이브러리를 제공하고 있다. 실험은 <그림 4>와 같이 알파벳, 음표, 원뿔, 타이어 모양 등의 다양한 물체들을 대상으로 물체들이 일정

높이에서 바닥으로 자유 낙하하는 상황을 수행하였으며, 시뮬레이션 동안 변형 물체들끼리의 충돌 문제와 바닥에 변형 물체가 부딪혔을 때 변형 되는 과정을 포함하여 연산 시간을 측정하였다.

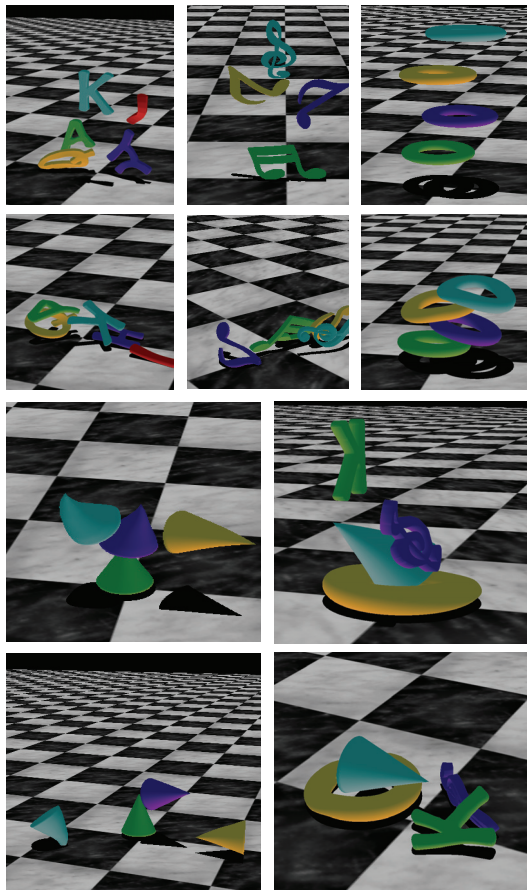


그림 4. 다양한 3D 변형 물체들의 자유낙하 및 충돌 시뮬레이션

Fig. 4. Free falling and collision simulation using various deformable objects

실험은 <표 1>과 같이 변형 물체를 1-5개 사용하여 700 프레임 동안의 평균 fps(frame per second)와 최저 fps를 측정하였다. 3D 변형 물체의 충돌 감지 및 해결을 위해서는 추가적인 연산이 필요하며, 이로 인해 변형 물체들의 충돌이 발생하는 순간에는 평균 fps에 비

해서 상대적으로 낮은 성능을 보이게 된다. 따라서 본 논문에서는 성공적인 실시간 3D 변형 물체 시뮬레이션을 위해 필요한 최저 fps를 측정하여 제시하였다.

표 1. 아이폰 5에서의 변형 물체 시뮬레이션 결과
Table 1. Result of simulation for deformable objects using iPhone 5

변형 물체수	평균 정점수	평균 삼각형수	평균 FFD셀수	평균 fps	최저 fps
1	2,809	5,636	100	17.46	17.46
2	1,016	2,030	97	17.59	15.13
3	509	1,015	97	17.91	16.03
4	215	426	89	17.04	15.17
5	214	426	95	14.41	12.39

<표 1>의 평균 정점 수, 평균 삼각형 수, 평균 FFD 셀 수는 각각의 시뮬레이션 실험에서 물체를 표현하기 위해 사용된 정점, 삼각형, FFD 셀의 평균 개수를 의미한다. 따라서 변형 물체 3개를 이용한 실험은 하나의 물체 당 509개의 정점과 1,015개의 삼각형, 97개의 FFD 셀을 이용하여 모델링 되었으며, 시뮬레이션 동안 평균적 17.91 fps을 나타내었으며, 가장 복잡한 연산을 진행 중일 때 최저 16.03 fps을 나타내었다.

일반적으로 스마트 디바이스에서 애니메이션, 게임 등의 구현을 위해 적용되는 3D 변형 물체들의 부드러운 움직임을 표현하기 위해서는 약 17 fps 정도가 필요하며, <표 1>은 이러한 실시간 3D 변형 물체 모델링에 대해서 어떻게 물체들을 모델링해야 하는지에 대한 적절한 가이드라인을 제시하고 있다.

V. 결 론

본 논문은 최근 스마트 디바이스용으로 개발되고 있는 애플리케이션들에서 요구되고 있는 다양한 3D 변형 물체들에 대한 시뮬레이션을 안정적이면서도 실

시간으로 부드럽게 처리가 가능한 방법에 대한 연구와 구현 및 성능 실험을 아이폰 5기반으로 수행하였다. 본 연구를 통하여 구현된 물리 기반의 FFD-AABB 알고리즘은 3D 변형 물체의 형태 분석을 바탕으로 2단계의 경계 구 검사 방법을 통해 변형 물체의 충돌을 검출하고 해결하여, 3D 변형체 시뮬레이션의 현실감 있고 몰입도 높은 어플리케이션 개발 환경을 제공하고 있다. 또한 본 논문은 스마트 디바이스에서 원활한 변형 물체의 움직임을 표현할 수 있는 실행 속도를 얻을 수 있는 3D 변형 물체 모델링에 대한 가이드라인을 제시하였다. 따라서 본 가이드라인을 참고하여 변형 물체들을 모델링한다면 모바일 디바이스에서 개발하는 게임 및 3D 물체 시뮬레이션 어플리케이션에서 실시간으로 자연스러운 변형 물체의 움직임에 대한 표현이 가능하다. 이에 본 연구의 결과는 지속적인 스마트 디바이스의 성능 향상과 맞물려 향후 더욱 복잡하고 정교한 3D 변형 물체 시뮬레이션을 가능토록 함으로써 다양한 분야의 어플리케이션에 성공적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] NIPA, "Statistic about the subscriber of wired and wireless communication services on July", National IT Industry Promotion Agency, 2013. 08.
- [2] KEA, "Monthly survey of ICT goods", Korea Electronics Association, 2013. 06.
- [3] KOCCA "Research on smart content market in 2012," Korea Creative Content Agency
- [4] A. R. Rivers and D. L. James, "Fastlsm: fast lattice shape matching for robust real-time deformation," SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 papers. New York: ACM, 2007, p. 82.
- [5] M. Müller, B. Heidelberger, M. Teschner, and M. Gross, "Meshless deformations based on shape matching," SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Papers. New York: ACM, 2005, pp. 471 - 478.
- [6] D. Baraff and A. Witkin, "Large steps in cloth simulation," in SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York: ACM, 1998, pp. 43 - 54.
- [7] K.-J. Choi and H.-S. Ko, "Stable but responsive cloth," ACM Trans. Graph., vol. 21, no. 3, pp. 604 - 611, 2002.
- [8] R. Bridson, R. Fedkiw, and J. Anderson, "Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation," in SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 2002, pp. 594 - 603.
- [9] N. Galoppo, M. A. Otaduy, P. Mecklenburg, M. Gross, and M. C. Lin, "Fast simulation of deformable models in contact using dynamic deformation textures," in SCA '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2006, pp. 73 - 82.
- [10] R. Bridson, S. Marino and R. Fedkiw, "Simulation of Clothing with Folds and Wrinkles," in Proceedings of the ACM SIGGRAPH /Eurographics Symposium on Computer Animation 2003, pp. 28-36.
- [11] M. Teschner, S. Kimmerle, G. Zachmann, B. Heidelberger, L. Raghupathi, A. Fuhrmann, M.-P. Cani, F. Faure, N. Magnetat-Thalmann, and W. Strasser, "Collision detection for deformable objects," in Eurographics State-of-the-Art Report (EG-STAR), Eurographics Association. Eurographics Association, 2004, pp. 119 - 139.
- [12] D. Baraff and A. Witkin, "Dynamic simulation of non-penetrating flexible bodies," SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 26, no. 2, pp. 303 - 308, 1992.
- [13] A. Deguet, A. Joukhadar, and C. Laugier, "A collision model for deformable bodies," Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on, vol. 1, pp. 636 - 641 vol.1, 13-17 Oct 1998.
- [14] M. Bro-Nielsen, "Surgery simulation using fast finite elements," Proc. Visualization in Biomedical Computing (VBC'96), pp. 529-534, 1996.
- [15] A. R. Rivers and D. L. James, "Fastlsm: fast lattice shape matching for robust real-time deformation," in

SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 papers. New York: ACM, 2007, No. 82

- [16] JaeHong Jeon, Min-Hyung Choi, Min Hong, "Enhanced FFD-AABB Collision Algorithm for Deformable Objects," Journal of Information Processing Systems, Vol.8, No.4, pp. 713~720, 2012.12.
- [17] M. Teschner, B. Heidelberger, M. Mueller, D. Pomeranets, and M. Gross, "Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects," in Proceedings of VMV'03, Munich, Germany, Nov. 2003, pp. 47 - 54.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음.

저자소개



전재홍 (Jae-Hong Jeon)

2012년 순천향대학교 컴퓨터 소프트웨어공학과(공학사)

2012년 ~ 현재 순천향대학교 대학원 컴퓨터학과 (석사 과정)

※ 관심분야: 컴퓨터 게임, 컴퓨터 그래픽스, 물리시뮬레이션, 증강현실



이승현 (Seung-Hyun Lee)

1996년 인하대학교 건축공학과(공학사)
1999년 콜로라도대학교 건설관리공학 전공 (공학석사)
2003년 플로리다대학교 건설관리공학 전공 (공학박사)

2004년~2008년 한국건설기술연구원 선임연구원

2008년~현재 홍익대학교 건축공학부 교수

※ 관심분야: 프로세스 시뮬레이션, 건설생산성, 건설 정보화, Image Processing, Automatic Data Acquisition



홍민 (Min Hong)

1995년 순천향대학교 전산학과 (공학사)

2001년 콜로라도대학교 컴퓨터공학 (공학석사)

2005년 콜로라도대학교 바이오인포메틱스(공학박사)

2006년 ~ 현재 순천향대학교

컴퓨터소프트웨어공학과 교수

※ 관심분야: 컴퓨터그래픽스, 컴퓨터게임, 컴퓨터 시뮬레이션, 바이오인포메틱스, u-Healthcare 시스템, 이미지 프로세싱, 모바일 프로그래밍