

Smoothed Particle Hydrodynamics 기반 고 밀집 군중 시뮬레이션 기법*

강신진^{*}, 이정^{**}, 김수균^{***}

홍익대학교 게임학부^{*}, 고려대학교 컴퓨터학과^{**}, 배재대학교 게임공학과^{***}
directx@hongik.ac.kr, airjung@korea.ac.kr, kimsk@pcu.ac.kr

High Density Crowd Simulation based on SPH

Shin Jin Kang^{*}, Jung Lee^{**}, Soo Kyun Kim^{***}
School of Games, Hongik University^{*}
Dept. of Computer Science, Korea University^{**}
Dept. of Game Engineering, Paichai University^{***}

요 약

고 밀집 상태의 군중 시뮬레이션은 객체 수에 따라 복잡도와 제작 비용이 크게 증가함으로 사실적인 움직임을 표현하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 고 밀집 군중 시뮬레이션 시 사실적인 움직임을 표현하기 위해 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 도입하였다. 본 연구에서는 유체 시뮬레이션에 사용되는 SPH 모델을 응용하여 객체 움직임에 필요한 회피력, 거리 유지력, 그룹 응집력을 새로이 제안하였다. 제안된 객체 운동 수식은 고 밀집 상태에서 유체와 같이 자연스런 객체 움직임을 표현하는데 효과적이다. 실험 결과, 본 시스템은 밀집도 높은 군중 시뮬레이션을 실시간으로 생성 가능함을 보였다.

ABSTRACT

Producing high density crowd simulation is time-consuming task as increasing the number of individuals in the crowds. In this paper, we propose a new control technique that can create realistic high density crowd simulation by using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method from fluid simulation field. Equations in SPH method are modified for evacuation, distance maintenance, and group maintenance forces for individual behaviors in the crowds. Experimental results showed that the proposed system could enable natural high density crowd simulation efficiently.

Keywords : Crowd Simulation, Smoothed Particle Hydrodynamics

접수일자 : 2011년 09월 19일 심사완료 : 2011년 10월 21일

교신저자(Corresponding Author) : 김수균

* 본 연구는 2011년도 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원을 받아 이루어졌습니다.

1. 서론

그래픽스 하드웨어가 발전함에 따라 기존의 하드웨어 제약으로 불가능하였던 그래픽 영상들이 상용 그래픽 콘텐츠에서 보여지고 있다. 군중 시뮬레이션은 그 중의 한 예로 최근의 비디오 게임, 영화 등에서 그 적용 사례가 늘어나고 있다. 군중의 움직임은 다양한 속성을 가진 객체들의 움직임들의 집합으로, 다양한 요소가 복합적으로 적용되어 예측이 힘들다. 이를 시뮬레이션하기 위해서는 군중의 움직임에 영향을 미치는 여러 요소들을 제작자가 손수 조정하는 작업 부담이 발생하게 된다. 이러한 작업 부담은 군중 내 객체 수가 늘어날수록 크게 증가하여 대규모 군중 씬을 제작하는데 걸림돌이 된다.

기존의 군중 시뮬레이션 연구는 효율적인 객체 제어 기법을 사용하여 최대한 사실적인 군중 움직임을 생성하는데 초점이 맞추어 왔었다. Reynolds [1]는 군중 시뮬레이션 연구에 있어 시초가 된 조향 행동에 필요한 제어 기법을 제안하였다. Chenny et al.[2]는 타일 기반의 고정적인 벡터장을 사용하여 다수의 에이전트를 제어할 수 있음을 보였다. Ulicny et al.[3]는 페인팅 인터페이스를 군중 제어 부분에 도입하여 브러쉬 액션을 통해 군중 시뮬레이션에 필요한 파라미터를 입력받을 수 있는 시스템을 제안하였다. [4,5]의 연구에서는 실제 군중 동영상 데이터로부터 군중 움직임에 필요한 벡터장을 생성하는 기법을 제안하였다. Kwon et al.[6]은 인접 에이전트와 인접성을 유지하면서 그룹 모션을 효과적으로 에디팅하는 방법을 제안하였다. Takahashi et al.[7]은 그룹 모션을 특정 대상 모션으로 자연스럽게 전이가 가능한 기법을 제안하였다. 이 연구에서는 pinning 혹은 dragging interaction을 통해 개별 에이전트를 제어하여야 했다. 최근에 들어 좀 더 손쉽고 직관적인 방법이 제안되고 있다. Jin et al.[8]은 방향을 설정할 수 있는 Anchor point를 주요동선 위치에 배치하고 이를 통해 군중 움직임에 필요한 벡터장을 생성하

는 기법을 제안하였다. Oshita et al.[9]는 유저에 의해 입력된 샘플 동선으로부터 다양한 군중의 움직임을 생성해 내는 기법을 제안하였다. Kang et al.[10]는 이미지 데이터를 활용한 군중 제어 기법을 제안하였다.

이러한 군중 제어 방식의 도입에 따라 기본적인 군중 시뮬레이션의 제작비용은 크게 감소하였다. 하지만 이러한 기법들은 일반적으로 저 밀집 환경에서의 군중 시뮬레이션에 적합하도록 설계되어 있어 다수의 객체들이 매우 근거리에서 밀집되어 있을 경우에는 병목 현상이 발생하는 등 부자연스러운 움직임을 보이는 단점이 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 최근에 고 밀집 환경에서의 군중 시뮬레이션 기법들에 관한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구의 한 예로 Rahul et al.[11]의 연구에서는 일방적인 비압축성을 활용하여 고 밀집 군중 시뮬레이션을 실시간으로 구현한 사례가 있다. 본 논문에서는 고 밀집 군중 시뮬레이션을 위한 새로운 군중 제어 기법을 제안하고자 한다. 이는 군중의 움직임이 연속적이면서도 질량을 보존하는 유체와 흐름과 유사하다는 점에 착안한 것이다. 본 연구에서는 유체 흐름에 적용되는 실용적 기법 중 하나인 SPH를 군중 시뮬레이션에 도입함으로써 고 밀집 상태의 군중의 움직임이 연속적이면서도 병목 현상을 보이지 않도록 하였다.

2. 기술적 배경

SPH는 천체 물리학, 탄도학, 화산학 등 다양한 분야에 사용되는 파티클 기반의 알고리즘이다[12].

그래픽스 분야에는 최근에 들어 유체 시뮬레이션에 적용되어 그 효용성을 인정받았다. SPH는 공간에 이산적으로 분포된 파티클에 정의된 값으로부터 smoothing kernel을 이용해 주변 파티클의 영향을 가중치를 두어 합하는 방법을 사용한다. 각 파티클은 압력, 중력 등의 외부 힘, 점성, 표면 장력에 의해 결정되는 힘으로부터 가속도를 계산하고

이로부터 새로운 속도를 계산한다. SPH 기법은 그리드 대신 파티클에서 시뮬레이션을 수행하므로 유체 시뮬레이션의 Navier-Stokes 식 중 질량 보존 제한과 대류 항을 생략할 수 있어 빠른 계산이 가능하다. SPH 기법에서 특정 파티클 j 를 대상으로 특정량 A 는 다음과 같은 (식 1)에 의해 결정된다.

$$A(r) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|r - r_j|, h) \quad (\text{식 1})$$

여기서 m_j 는 파티클 j 의 질량이고 A_j 는 파티클 j 에 대한 특정량 A 의 값이다. ρ_j 는 파티클 j 의 밀도이다. r 은 위치값이고 h 는 smoothing length 값이고 W 는 커널함수이다. 밀도를 예를 들자면 특정 위치 r_i 에서의 밀도값은 다음과 같은 (식 2)로 표현될 수 있다.

$$\rho_i = \rho(r_i) = \sum_j m_j \frac{\rho_j}{\rho_j} W(|r_i - r_j|, h) \quad (\text{식 2})$$

위와 비슷하게 특정값의 변화량은 커널 함수값에 $\text{Del}(\nabla)$ 연산을 적용함으로써 얻어질 수 있다.

$$\nabla A(r) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla W(|r - r_j|, h) \quad (\text{식 3})$$

SPH 기법의 결과는 커널 함수 W 의 종류와 smoothing length인 h 의 값에 영향을 받는다. 커널함수로는 일반적으로 가우시안 함수나 큐빅 스플라인 함수가 사용된다. 커널 함수의 종류에 따라 거리 따른 밀집도의 속성이 결정되고 h 의 길이에 따라 그 영향력의 범위가 결정된다. h 가 커질수록 파티클 주변 반경 범위 내 속성이 반영되는 파티클의 수가 커지게 된다. 이는 시뮬레이션의 해상도를 높아짐에 따라 연산 비용은 증가하지만 좀 더 부드러운 결과값을 내게 된다. SPH의 적용 분야에 따라 이러한 커널함수와 smoothing length는 각각 차이가 있게 된다.

본 논문에서는 실시간 유체 시뮬레이션 분야에서 그 안정성과 효율성이 검증된 muller[13]의 SPH 커널함수와 반경값을 군중 시뮬레이션을 위한 기본 수식으로 사용하였다.

3. 고 밀집 환경에서의 군중 시뮬레이션

고 밀집 환경에서 군중의 효과적으로 제어하기 위해서는, 수치적으로 정량화시킬 수 있는 군중 움직임 요소들이 먼저 선별되어야 한다. 본 논문에서는 군중 움직임을 컨트롤하는데 있어 필요한 중요 속성들을 다음 3가지로 선별하였다.

- 1) 회피성: 각 객체(individual)들은 충돌을 방지하기 위해 회진, 이동, 정지 등의 회피 움직임을 보인다.
- 2) 거리 유지성: 각 객체들은 다른 객체와의 관계의 수준에 따라 이동 혹은 정지 중에 상호 일정 거리를 유지한다.
- 3) 연계성: 각 객체들은 다른 객체들과의 관계의 종류와 강도에 따라 집단을 이루었을 때 움직임을 달라진다. 군대와 같은 높은 연계성을 가진 집단에서는 움직임 시 강한 상호 연계성을 보인다.

군중을 컨트롤하기 위해서는 위와 같은 제어 요소들이 사용자에게 파라미터화 되어 노출되어야 하며, 이를 제어함으로써 효과적으로 의도하는 움직임을 만들어 낼 수 있어야 한다. 본 논문에서는 위의 3가지 요소를 각각 회피력, 거리 유지력, 그룹 유지력으로 구분하여 이를 객체 운동 수식에 반영하고자 하였다.

4. 객체 운동 수식

본 연구는 다수의 군중이 밀집되어 있는 상황에서 좀 더 부드러운 군중 흐름을 만들어 내는 것을

목표로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Muller의 기법을 응용하여 3장에서 기술된 군중 움직임의 속성을 만족시킬 수 있는 회피력(favoid), 거리 유지력(frep), 그룹 유지력(fgroup) 수식을 새로이 제안하였다. 각 객체들의 기본적인 움직임을 위해 다음의 3가지 힘을 계산하게 된다. 아래의 힘들은 각 객체(i) 단위로 계산되는 것으로 각 객체는 3가지 힘의 합으로 움직임에 필요한 최종 힘을 계산하게 된다(식 4).

$$f_i = f_i^{avoid} + f_i^{rep} + f_i^{group} \quad (\text{식 4})$$

4.1 회피력

본 연구에서는 객체의 기본적인 회피를 위하여 다음과 같은 회피식을 사용하였다. 본 연구에서는 회피력을 상호간에 회피하려는 압력으로 가정하고 이 압력을 계산하기 위해 Muller의 SPH 압력식을 다음과 같이 수정하였다(식 5). 여기서 m_j 는 파티클 j 의 질량이고 p_j 는 파티클 j 에 대한 회피력이다. P_i 는 파티클 i 가 주는 압력으로 평행 상태의 압력 ρ_0 와 현재 상태의 압력 ρ 와의 차이값에 비례한다(식 6). 회피력을 위한 커널 함수로는 spiky gradient kernel (식 7)을 사용하였다. T 은 회피 벡터로 계산된 압력값을 힘으로 전환시켜 주는 역할을 한다. T 의 종류에 따라 다양한 세부 움직임이 생성될 수 있다. 회피 벡터로는 0 - 90도 사이의 회전 각도값들이 객체별로 랜덤으로 생성되도록 하여 하였다. 회피력 수식은 밀도값 차이에 의해 영향을 받도록 되어 있으므로 고 밀집 환경에서 회피하려는 경향이 크게 일어나게 된다. 이는 고 밀집 환경에서 병목 현상이 발생하는 것을 방지하게 된다.

$$f_i^{avoid} = \sum_j m_j T \frac{p_i + p_j}{\rho_j} \nabla W(|r_i - r_j|, h) \quad (\text{식 5})$$

$$p_i = k(\rho - \rho_0) \quad (\text{식 6})$$

$$W_{spiky}(r, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h-r)^3 & (0 \leq r \leq h) \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (\text{식 7})$$

4.2 거리 유지력

거리 유지를 위해서는 다음과 같은 (식 8)을 사용하였다. 이는 기존의 SPH 점성식을 군중 시뮬레이션에 맞도록 수정한 것이다. 여기서 v 는 파티클 속도이고 h 는 유지 거리이다. 회피력과 마찬가지로 거리 유지를 위해 이동 벡터(R)이 다양한 움직임을 위해 랜덤 생성된다. 커널 함수로는 (식 9)를 사용하였다. 거리 유지를 위한 기본 간격은 개체 크기의 1.1 ~ 1.5배 범위 내에서 랜덤으로 생성되도록 설정하였다. 거리 유지력은 각 객체간의 속도 차이에 영향을 받는다. 때문에 속도차이가 큰 객체간에는 거리를 유지하려는 힘이 강하게 나타남으로써 충돌을 방지하게 된다. 만약 두 객체간의 속도가 비슷하다면 거리 유지력은 약하게 나타나고 회피력과 그룹 유지력이 상대적으로 강하게 발현된다.

$$f_i^{rep} = \sum_j m_j R \frac{v_i - v_j}{\rho_j} \nabla^2 W(r_i - r_j, h) \quad (\text{식 8})$$

$$W_{rep}(r, h) = \frac{15}{\pi h^3} \begin{cases} -\frac{r^3}{2h^3} + \frac{r^2}{h^2} + \frac{h}{2r} - 1 & (0 \leq r \leq h) \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\nabla^2 W_{rep}(r, h) = \frac{45}{\pi h^6} (h - r) \quad (\text{식 9})$$

4.3 그룹 유지력

본 시스템에서는 그룹의 현재 위치를 저장하여 이를 객체간의 객체들이 유지하고자 하는 형태로 정의하도록 하였다. 이 단계에서 각 객체간의 거리와 방향 정보를 데이터 구조체에 저장한 뒤 실시간 군중 시뮬레이션 단계에서 그 값을 현재 상태와 비교하여 그 차이를 최소화시키는 힘 f^{group} 을 계산하였다. 이 값이 각 객체에 반영됨으로써 그룹 전체적으로는 의도했던 포메이션 형태를 유지할 수

있도록 하였다. 이를 위해 다음과 같은 (식 10)을 사용하였다. 여기서 t 는 시물레이션 현재 시간이고 t_s 는 그룹의 형태가 저장된 시간이다. j 는 각각의 파티클 간의 관계의 수이다. d 와 v 은 i, j 객체간의 상대적 거리와 방향 벡터이다. 커널함수로는 가우시안 함수를 썼다. 포메이션 강도는 각 객체별로 가지게 되는 상호 연관 링크 수 j 에 비례하여 증가하게 된다.

$$f_i^{group} = \sum_j m_j W(d(t_s) - d(t), d(t_s)) \frac{v(t)}{\|v(t)\|} \quad (\text{식 10})$$

5. 구현 결과

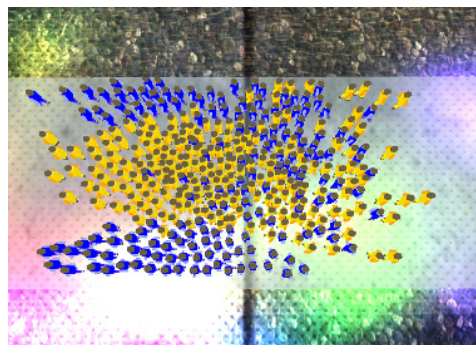
본 시스템은 Windows XP 운영 체제, Intel Core2 CPU 2.40GH, 2GB 메모리의 환경에서 C++와 Visual Studio 2008을 사용하여 구현하였다. 이러한 구성은 SPH 연산을 포함하여 1,200개의 폴리곤으로 구성된 객체를 초당 12 프레임으로 최대 900개를 애니메이션 시킬 수 있는 성능을 보여줬다. 본 연구에서는 3가지 실험을 통해 본 연구의 유용성을 확인하고자 하였다.

첫 번째 실험은 고 밀집 환경에서 각각의 객체들이 정상적으로 회피하며 상호 최소한의 거리를 유지하는지를 확인하고자 하였다[그림 1]. 이를 위해 의도적으로 좁은 통로를 구성하여 2개의 그룹이 서로 반대 방향으로 통과하는 실험을 해 보았다. 실험 결과 두 개의 그룹은 통로 중앙 부분에서 만나 일시적인 혼잡 현상을 보였다([그림 1](a)). 혼잡 현상은 파란색 그룹이 좌우로 분산되면서 해소되었는데 이는 파란색 그룹은 노란색 그룹보다 회피력이 높게 설정되어 있어서이다([그림 1](b)). 통로 중앙을 통과한 뒤 두 개로 갈라진 파란색 그룹과 노란색 그룹은 각기 일렬로 정렬되는 줄서기 효과 (lane formation)를 자연스럽게 보이고 있다. 이는 고 밀집의 환경에서도 회피력과 반발력이 정

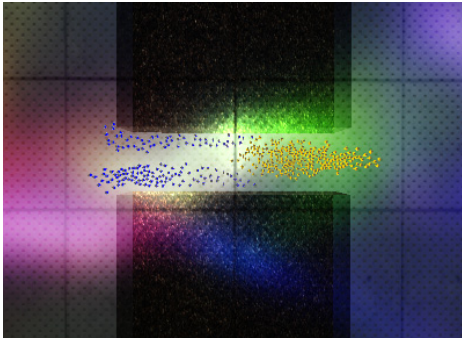
상적으로 작동하여 이동이 불가능해지는 병목 현상 없이 자연스런 군중의 움직임을 보임을 알 수 있다.

두 번째 실험은 고 밀집 환경에서 그룹 유지력 효과를 보기 위한 실험이다. 이를 위해 그룹 유지력을 가진 그룹([그림 2](a))과 가지지 않은 그룹([그림 2](b))을 비교하였다. 그룹 유지력이 지정된 그룹은 이동 반대 방향으로 다가오는 고 밀집의 군중을 통과하였을 때 그룹의 포메이션이 흩어지지 않고 유지됨을 볼 수 있다. 이는 그룹을 구성하고 있는 객체 간의 상대 거리와 방향이 이동 중에 회피력과 반발력에 의해 영향을 받아 변경되더라도 일정 시간이 흐르면 원래 지정된 위치대로 성공적으로 복원됨을 보여준다.

세 번째 실험은 좀 더 다수의 객체로 구성된 시물레이션을 진행해 보았다[그림 3]. 이 실험은 강한 그룹 유지력을 가진 소수의 그룹이 약한 밀집도를 가진 그룹을 통과하는 실험으로 영화에서 강한 결속력을 가진 기마 군대가 보병 군대 집단을 돌파하는 모습을 시물레이션 해 본 것이다. 실험 결과 방추 형태 진행을 가진 파란색 그룹이 진행을 유지한 채 회색 그룹을 효과적으로 양분하는 모습을 보여준다.

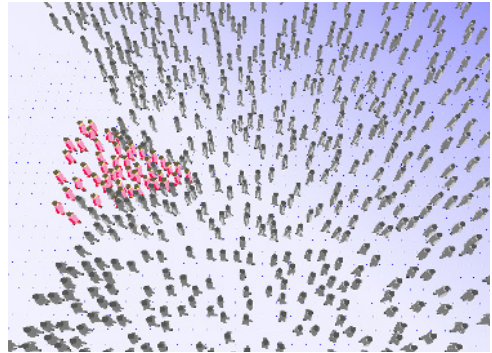


(a)



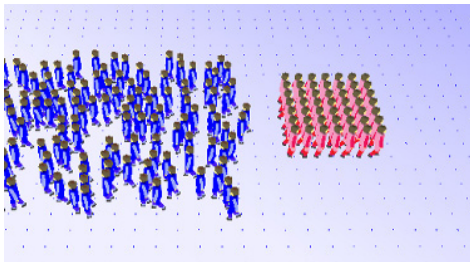
(b)

[그림 1] 고 밀집 환경에서 군중 시뮬레이션 결과

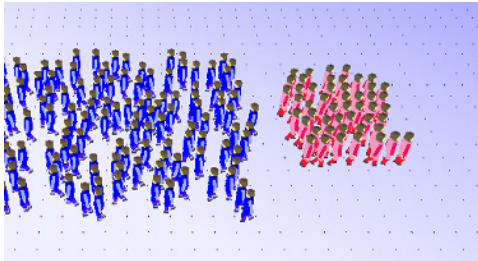


(b)

[그림 3] 고 밀집 환경에서 그룹 유지 효과

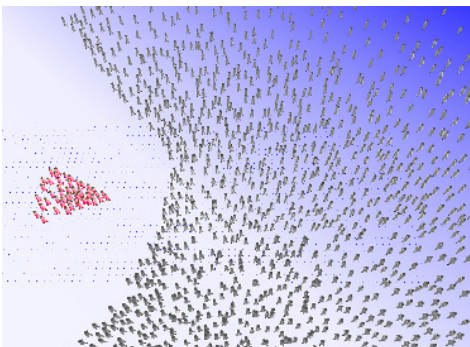


(a)



(b)

[그림 2] 고 밀집 환경에서 그룹 유지 효과 비교



(a)

6. 결 론

본 논문에서는 유체 시뮬레이션에서 사용되는 SPH 수식을 군중 시뮬레이션에 적합하도록 변형하여 적용하였다. 적용 결과 고 밀집 환경에서 병목 현상이 발생하지 않으면서도 연속적인 군중 움직임을 확인할 수 있었다. 또한 고 밀집 환경에서 군중의 집합적 움직임을 추가적으로 보일 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안된 기법은 밀집도 높은 군중 시뮬레이션 제작 시 제작 부담을 줄이고 사실적인 결과물을 생성해 내는데 기여할 수 있을 것이다. 향후 연구로는 제안된 SPH 모델을 GPU로 가속하여 본 시스템의 실시간 처리 성능을 좀 더 향상시키고자 한다.

참고문헌

- [1] Reynolds, C. W. "Steering behavior for autonomous characters," Game Developers Conference, 1999.
- [2] Chenney, S. "Flow tiles," Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 233-242, 2004.
- [3] Ulicny, B., Ciechomski, P.H. and Thalmann, D. "Crowdbrush: interactive authoring of

- real-time crowd scenes,” Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer Animation, pp. 243-252, 2004.
- [4] Lerner, A., Chrysanthou, Y. and Lischinski, D. “Crowds by example,” Computer Graphics Forum Vol. 26, pp. 655 - 664, 2007.
- [5] Lee, K. H., Choi, M. G., Hong, O. Y., and Lee, J. H. “Group Behavior from Video: A Data-driven Approach to Crowd Simulation,” ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 109-118, 2007.
- [6] Kwon, T. S., Lee, K. H., and Lee, J. H., Takahashi, S. “Group Motion Editing”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 3, pp. 80, 2008.
- [7] Takahashi, S., Yoshida, K., Kwon, T. S., Lee, K. H., and Lee, J. H. “Spectral-Based Group Formation Control,” Computer Graphics Forum, Vol. 28, No. 2, 2009.
- [8] Jin, X., Xu, J., Wang, C. C. L. Huang, S. and Zhang, J. “Interactive control of large crowd navigation in virtual environment using vector field,” IEEE Computer Graphics and Applications, 28, pp. 37-46, 2008.
- [9] Oshita, M. and Ogiwara, Y. “Sketch-Based Interface for Crowd Animation,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5531, pp.253-262, 2009.
- [10] 강신진, 감형렬, 신승호, 김창현, “이미지 데이터를 활용한 군중 제어 기법,” 한국컴퓨터그래픽스학회 추계학술대회, pp. 27-28, 2009.
- [11] Rahul Narain, Abhinav Golas, Sean Curtis, and Ming C. Lin, Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation. In ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia), vol. 28, no. 5, pp. 122:1 - 122:8. (2009)
- [12] Benz, W. “Smooth particle hydrodynamics: a review,” The Numerical Modeling of Nonlinear Stellar Pulsations, pp. 269-288, 1990.
- [13] Müller, M., Charypar, D., and Gross, M. “Particle-based fluid simulation for interactive applications,” Proceeding of ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 154 - 159, 2003.



강 신 진 (Kang, Shin Jin)

2003년 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과 이학석사
2011년 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과 이학박사
2003년-2006년 소니 컴퓨터 엔터테인먼트 코리아
(Sony Computer Entertainment Korea),
주임연구원
2006년-현재 엔씨소프트, 차장
2008년-현재 홍익대학교 게임학부, 전임강사

관심분야 : 게임 기획, 컴퓨터 그래픽스, 데이터 마이닝



이 정 (Lee, Jung)

2002년 고려대학교 컴퓨터학과 이학석사
2006년 고려대학교 컴퓨터학과 이학박사
2006년 고려대학교 BK21 산업단 연구교수
2006-2008년 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2008년-현재 고려대학교 BK21 산업단 연구교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전



김 수 균 (Kim, Soo Kyun)

2006년 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터학과 이학박사
2006년-2008년 삼성전자 통신연구소 책임 연구원
2008년-현재 배재대학교 게임공학과 조교수

관심분야 : 기하모델링, 게임그래픽, 실감미디어