

# 지면의 미끄러운 정도에 따른 캐릭터의 걷기 동작 생성

이 금 희<sup>†</sup> · 송 미 영<sup>\*\*</sup> · 조 형 제<sup>\*\*\*</sup>

## 요 약

3차원 가상현실 내에서 캐릭터 움직임 동작의 기술은 기존 방식인 키프레임 기법에 의존하던 것이 점차 동작 제어 기법을 활용하고, 보다 사실적이고 자연스러운 움직임을 생성해 내고자 하는 방향으로 발전해 가고 있다. 그러나 이러한 동작 제어 기법을 통해 가상현실의 지형 성질에 따라 적응적인 캐릭터의 동작을 표현하는데 한계가 있다. 즉, 대부분의 가상환경에서 캐릭터의 걷는 움직임은 일정하고 단조로운 동작만을 반복하여 표현하고 있어 관찰자로 하여금 지루함을 느끼게 하고, 지형의 조건이나 형태에 맞지않게 캐릭터의 발끝이 지면에 스며들거나 떠있는 등의 부자연스러운 동작으로 인해 사실감을 저하시킨다.

본 논문에서는 적은 매개변수들과 역운동학 방법을 적용하여 기본 걷기 동작을 표현하고, 지면의 성질을 마찰계수로 대표시켜 지면에 적응적인 걷기 동작의 생성 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 구심력과 마찰계수를 결합한 후, 이를 근거로하여 한 주기 동안의 걷는 동작을 분석하고 이를 기반으로 동작에 필요한 매개변수를 조정하여 지면에 따른 적응적인 캐릭터의 걷기 동작을 생성한다.

## Generation of Humanoid Walking Motion Adapted to the Ground's Sliding Properties

KumHee Lee<sup>†</sup> · MiYoung Song<sup>\*\*</sup> · HyungJe Cho<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

In 3D virtual environment, the description of character's movement that has utilized the conventional key-frame technique is gradually being developed toward the application of motion control method to generate more realistic and natural motion. Even the motion control method, however, has the limitation for expression of character's motion adapted to the ground properties of virtual world. That is, the walking motions of character are not only, for the most part, so uniform, simple and repeated often as to feel to be tedious, but also the unnatural motion in which the tips of the toes soak through a plane or float in the air discording with the conditions of terrain lowers the semblance of reality.

This paper proposes an adaptive motion control method for human figure locomotion in virtual environments or games, in which the walking motion is dynamically adapted to the ground's sliding properties. We compute an optimal parameters for one cycle of walking motion adapted to the ground properties by combining the coefficient of friction and centripetal force, and therefrom we induce a set of nonskid speed corresponding to various sliding properties of the ground.

**키워드 :** 걷기 동작(walking motion), 역운동학(inverse kinematics), 구심력(centripetal force), 마찰계수(coefficient of friction)

### 1. 서 론

최근 하드웨어 기술과 소프트웨어의 빠른 발전으로 인하여 게임 분야와 가상현실 시스템 분야는 빠르게 발전해 왔다. 특히 컴퓨터의 초고속화, 대용량화, 지능화에 따라 가상현실 기술이 다양한 게임 개발의 하나의 분야로 자리 잡고 가고 있는 추세이다. 3차원 게임 분야에서는 등장하는 캐릭터의 자연스러운 동작과 주위 환경과의 상호 작용은 게임의

품질을 좌우하는 결정적인 요소가 되기 때문에, 가상현실이나 게임에서 사실적이고 실시간으로 캐릭터의 동작을 생성해야 하는 경우가 빈번하게 발생한다. 특히, 인체를 비롯한 다관절체의 동작 생성에 있어서 지형이나 다른 주변 환경에 의한 적응적인 동작에 사실성을 강조하여 실시간으로 자동 생성할 필요성이 증가하고 있어 관심이 높아지고 있는 분야이다[1][2].

가상 캐릭터의 움직임을 생성하기 위해서는 지금까지 주로 키프레임(Key-frames) 보간 기법이 많이 사용되고 있다. 이는 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라 만들어진 동작 데이터의 질이 애니메이터의 숙련도에 결정적으로 좌우된다. 동력학(Dynamics)에 의거하여 사실적인 동작을 얻고자 하는 시도도 많이 있었으나 인체와 같이 복잡한 다관절

\* 본 연구는 2002년도 한국과학재단 특정기초연구(과제 번호: R01-2002-000-00298-0) 내용의 일부임

† 정 회 원 : 한국문화콘텐츠진흥원

\*\* 윤 회 원 : 수원여대 멀티미디어통신과 전임강사

\*\*\* 정 회 원 : 동국대학교 멀티미디어학과 교수

논문접수 : 2004년 7월 24일, 심사완료 : 2005년 3월 7일

체에 대해서는 많은 계산 시간을 요구한다. 또한, 생성된 동작이 사실적이라 할지라도 주변 환경 혹은 가상 캐릭터들간의 상호 작용을 적절히 시뮬레이션하지 못하면 가상 캐릭터가 주변 물체를 뚫고 지나가는 것과 같은 비현실적인 동작을 만들게 된다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 최근 모션 캡처 시스템을 이용한 방법에 대한 연구가 계속되고 있다. 그러나 제한된 동작과 그 동작을 수작업으로 편집하여야 하는 번거로움으로 인해 실시간으로 적응적인 동작을 생성하는 것은 어려움이 따른다.

본 논문은 게임이나 가상현실에서 표현하는 지면의 성질을 고려하지 않은 걷기 동작이나 다른 주위 환경에서도 일정한 동작만을 생성하는 방법에서 벗어나 지면의 미끄러지는 정도의 지면 성질에 따라 적응적인 걷기 동작을 생성하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 얼음, 진흙 등과 같은 지면의 성질을 마찰계수로 대표하고, 적은 매개 변수와 역운동학(Inverse Kinematics) 방법을 적용하여 캐릭터의 걷기 동작을 표현한다. 여기서 걷기 동작에 의한 운동의 힘은 구심력을 통해 분석하여 지면의 성질인 마찰계수와 서로 결합한 후, 이를 근거로하여 한 주기 동안의 걷는 동작을 분석하고 이를 기반으로 동작에 필요한 매개변수를 자동 조정하여 지질에 따른 적응적인 캐릭터의 걷기 동작을 생성한다.

논문의 구성을 살펴보면, 2장에서는 관련연구에 대한 기존 방법들을 기술하고, 3장에서는 걷기 동작을 생성하기 위하여 캐릭터 모델과 기본 걷기 동작 계획에 대하여 설명한다. 4장에서는 기본 걷기 동작 계획을 토대로 하여 지면과의 마찰계수를 근거로 한 걷기 동작을 분석하고 기술하며, 5장에서는 마찰계수를 고려한 걷기 동작 구현 환경과 실험 결과를, 6장에서는 결론과 향후과제에 대해 언급한다.

## 2. 관련 연구

실시간 컴퓨터 그래픽스에서는 가상 환경내에서 물체의 움직임을 제어할 때, 물체의 움직임을 효과적으로 기술하는 방법과 물체의 움직임을 효율적으로 자동 생성하는 방법이 필수적이다. 게임이나 가상현실에서는 지형이나 다른 주변 환경에 의한 적응적인 동작을 실시간으로 자동 생성하는데 있어서 자연스럽게 동작을 표현하기는 매우 어렵기 때문에 캐릭터의 보행 동작의 움직임은 일정한 동작만을 생성하여 가상공간에 표현한다. 최근의 동작 생성에서는 실세계의 물리 법칙을 적용하고, 이를 수치 해석 방법으로 해석함으로써 사실적인 동작을 생성하는 역학적 시뮬레이션 방법들이 주로 사용되고 있다. 이러한 3차원 캐릭터 애니메이션의 제작에 있어서 캐릭터의 생명을 표현하기 위해 물리적 법칙을 비롯한 일련의 규칙에 의해 자동 혹은 반자동적으로 동작을 생성하는 기법을 적용하는데 이를 통칭하여 동작 제어 기술이라 한다[3]. 동작 제어 기법은 크게 키프레임(Key-Frames), 운동학(Kinematics), 역학(Dynamics) 그리고 동작 편집(Motion Editing) 방법 등으로 분류할 수 있으나 키프레

임 기법은 모든 동작 제어에 공동적으로 적용된다.

키프레임 기법은 시간축에 따라 캐릭터를 구성하고 있는 각 관절의 연결 각도와 캐릭터 자체의 공간적 위치 등을 애니메이션이 수작업으로 동작을 제어하는 전통적인 방법이다. 이는 실제 사람과 매우 유사하게 동작을 생성할 수 있지만 원하는 동작 결과를 얻기 위해서는 전문적인 수작업의 재능이 요구되고 많은 노력이 필요하다. 또한 키프레임 간의 연결 동작을 위해서 보간 동작의 생성이 필요하다.

키프레임을 이용하고 키프레임 간의 자연스러운 연결 동작을 위해 적절한 보간 기법을 적용하며 각 관절의 접합 위치(Joint Position)와 각도로부터 관절 끝(End Effector)의 위치를 운동학적으로 산출하여 동작을 생성하는 방법이 운동학적 기법(Kinematics Techniques)이다[4][5][6][7][8]. 이 기법으로는 계층구조의 상위에 있는 관절을 조작하여 동작을 제어하는 전운동학(Forward Kinematics) 방법과 계층구조의 하위에 있는 관절을 조작하여 동작을 제어하는 역운동학(Inverse Kinematics) 방법 등이 있다. 운동학적 기법은 구현이 쉽고 다관절체들을 정밀하게 제어할 수 있으며 계산 비용이 적게 들기 때문에 실시간 동작을 생성하는데 적합하다. 그러나 실제 사람과 같은 자연스러운 동작을 생성하기에는 부적합하고, 다관절체의 움직임 표현은 인체 및 동물의 골격 구조로부터 제약 조건을 끌어내야 하므로 해부학과 운동학에 대한 지식이 필수적이어야 한다는 단점이 있다. 또한 키프레임 간의 자연스러운 동작 표현은 보간 방법에 매우 의존적이다[4][5][6][7][8].

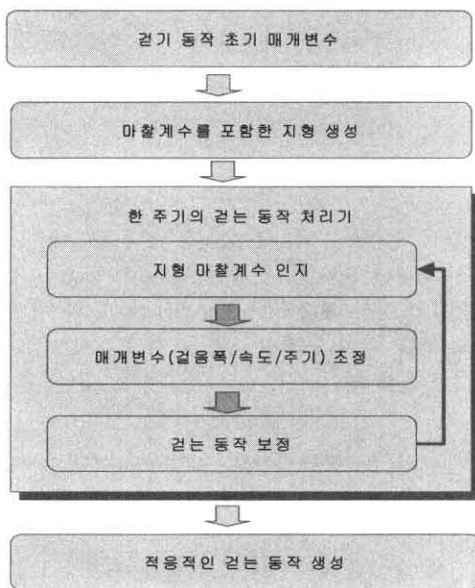
역학적 기법(Dynamics Techniques)은 캐릭터 움직임의 중요 단계를 수작업에 의해 지정하는 키프레임 기법이나 운동학적 기법과는 다르게 더 사실적인 동작을 생성하기 위해 물리적인 법칙을 적용하는 기법이다. 즉, 뉴턴 법칙의 각속도와 각가속도, 회전력 등의 물리적인 역학과 일련의 규칙에 의해 동작을 생성하는 방법이다[7]. 이 기법은 적은 조건만으로도 그 결과가 매우 사실적이고 자연스러운 실제적인 움직임을 생성할 수 있고, 다양한 입력 조건에 따라 다양한 시뮬레이션 결과를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 물리적인 접근의 구현 자체가 매우 까다롭고 물리적인 역학의 지식을 많이 필요로 한다. 무엇보다 구체적이고 직접적인 제어가 불가능해 결과를 예측하기 힘들어 자동화된 동작을 표현하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 움직임을 위해 어떤 형태든 제어 프로그램의 계산이 수행되어야 하므로 실시간 동작 제어가 어렵다[4][5][8][9][10].

최근에 연구가 활발히 이루어지는 동작 편집 기법(Motion Editing Techniques)은 동작 포착 장비에서 얻어진 데이터를 이용하여 사용자의 용도에 따라 서로 다른 동작 데이터들을 연결하거나 결합하여 원하는 동작으로 재편집하는 방법이다[7]. 모션 블렌딩(Motion Blending) 방법은 서로 다른 동작간의 연결을 위해서 보간 동작을 생성하는 것으로 동작 생성을 위한 동작 데이터베이스를 필요로 한다. 이 기법은 액션 게임이나 스포츠 게임 등에서 자연스러운 동작들을 만들기 위해 적용한다[7][11][12]. 그리고 이 방법의 결과로 생

성되는 동작의 정밀도는 미리 획득한 동작 데이터베이스의 양에 비례한다고 할 수 있다. 모션 와핑(Motion Warping)방법은 전이함수(Displacement Mapping)라고도 하며, 이는 동작 신호의 전역성을 보존하고 일관성을 유지하면서 전이 함수를 통해 지역적으로 동작 신호를 변환하여 새로운 동작을 생성한다. 전이 함수 처리를 통해서 원하는 동작의 결과물을 얻을 때까지 반복적인 수행이 요구되며 결과 동작에 대한 적절한 제어가 어렵다[7][13][14]. 시공간 제한성(Spacetime Constraint) 방법은 전체적인 동작을 동시에 고려하여 새로운 동작을 생성하는 것으로 사용자는 전체 동작상의 제한성을 기술할 수 있으나, 이러한 제한조건에 맞는 최적의 동작을 얻기 위한 해결책이 요구된다. 이 방법은 물리적인 실제 동작을 합성하여 동작을 생성할 수 있지만, 많은 요소(Factor)들을 필요로 하기 때문에 적절한 상호적인 편집을 지원하지 못하며 최적의 동작 생성을 위한 해결책을 찾는 데 계산적 비용이 크다[7][12][15][16][17]. 모션 리타겟팅(Motion Retargetting) 방법은 포착된 동작 데이터들을 신체 크기가 다르거나 다양한 유형의 캐릭터에 적용할 수 있도록 동작을 편집하는 기법이다. 따라서 포착된 하나의 동작 데이터를 자동으로 변형하여 다양한 캐릭터의 동작을 제작할 수 있다는 장점이 있으며 가장 최근에 게임이나 가상현실 분야에서 가장 많이 쓰이고 있다[7][11][18]. 그러나 다양한 유형의 캐릭터에 적용하기 위해서 포착된 데이터를 분석하는 것이 쉽지 않으며 최적의 결과 동작을 생성할 수 있다는 보장이 없다.

### 3. 캐릭터 모델과 걷기 동작 계획

마찰계수를 근거로 한 지면의 성질에 따른 적응적인 동작을 생성하는 과정(그림 1)은 동작에 필요한 초기 매개변수를

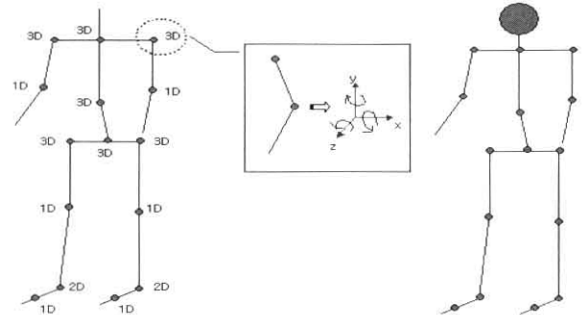


(그림 1) 지질에 따른 동작 생성 과정

와 마찰계수를 포함한 지형을 인지하여 걷기 동작을 생성한다. 여기서 마찰계수를 포함한 지형에 적응적인 걷기 동작을 생성하기 위해서, 본 논문에서 제안한 마찰계수를 근거로 한 걷기 동작 분석 방법을 기반으로 한 주기 동안의 걷기 동작이 지형의 성질에 적응하며 자연스러운 동작을 생성하는지를 검사한다. 이 때 마찰계수를 근거로 한 걷기 동작 분석을 통해서 지질에 따른 적응적인 동작 생성에 위반될 경우, 동작에 영향을 미치는 매개변수들을 새로 자동 조정하여 보정된 걷기 동작을 생성한다.

#### 3.1 캐릭터 모델

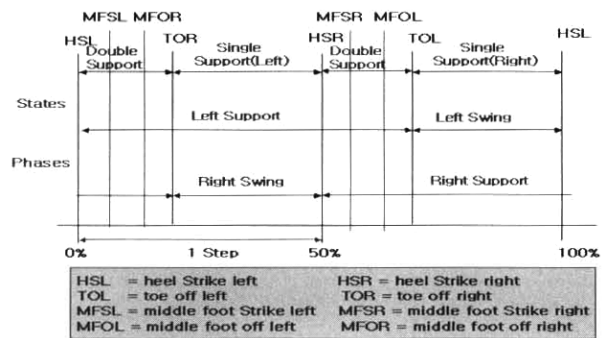
지질에 따른 걷기 동작을 위한 캐릭터는 인체 모형과 같이 뼈대(skeleton)의 세그먼트로 구성한다(그림 2). 즉, 세그먼트들이 서로 연결된 15개의 조인트로 구성하고, 관절의 연결 부분은 회전을 위한 자유도를 가진다. 걷는 동작에서 발의 움직임을 더 세밀하고 자연스러운 걷기 동작을 표현하기 위해 발의 중간점(middle feet)을 추가하여 15개의 연결 부분과 31개의 자유도로 구성한다[17].



(그림 2) 캐릭터 모델

#### 3.2 동작 주기

걷기 동작의 한 주기는 두 단계로 이루어진다. 첫 번째는 한 주기동안 발이 지면에서 떨어지지 않고 지면에 몸을 지탱하여 중심을 잡아주는 단계(Support Phase)이다. 두 번째는 발이 지면에서 떨어져 이동하는 단계(Swing Phase)이다 [3][7][10][19][20].

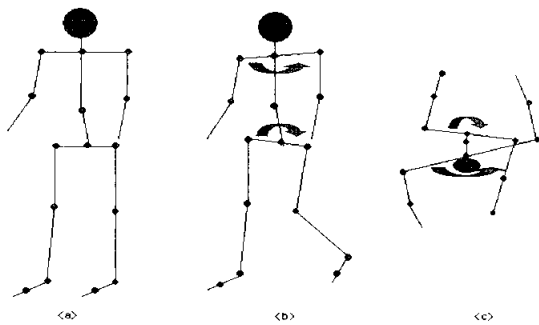


(그림 3) 걷는 주기

본 논문에서는 걷기 동작에서 좀 더 발의 움직임을 자연스럽게 상세하게 동작을 표현하기 위해 발의 중간 지점을 추가한다. 이에 대한 걷기 동작의 한 주기를 표현한 것이 (그림 3)이다. 즉, 왼쪽 다리가 지면에 접촉하여 몸의 중심을 지탱하고 있는 동안 오른쪽 다리가 지면에서 떨어져 이동하고 있는 과정의 예를 표현한 것이다. (그림 3)에서 MFSL(Middle Foot Strike Left)은 왼쪽 발의 중간지점이 지면에 접촉하는 지점이고, MFOR(Middle Foot Off Left)은 오른쪽 발이 지면에서 떨어져 이동하기 시작하는 지점을 나타낸다.

3.3 기본 걷기 동작

걸을 때 다리의 동작은 골반에 따라 움직이기 시작하고, 상체의 움직임은 골반의 동작에 의한 작용과 반작용으로 이루어진다. 기본 걷기 동작을 생성하기 위해 걷는 주기 동안의 어깨와 골반의 회전되는 모습을 살펴보면 (그림 4)와 같다.



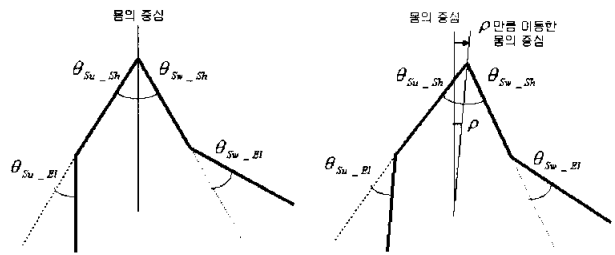
(그림 4) 골반과 어깨의 회전

(그림 4(a))는 캐릭터가 걷기를 시작하기 위한 준비 자세이고, (그림 4(b))와 (그림 4(c))는 한쪽 다리가 지면에서 떨어져 이동하여 걷는 한 주기의 중간 지점일 때를 표현한 것으로, 각각 정면과 윗면에서 관찰한 경우를 나타낸 것이다. (그림 4(b))는 골반과 어깨의 상·하 회전을 표현한 것으로, 지면에 떨어져 이동하고 있는 다리의 골반은 아래로 향하고, 이 때 어깨의 방향은 골반과 반대로 위로 향한다. (그림 4(c))는 골반과 어깨의 앞·뒤 회전을 표현한 것으로, 지면에 떨어져 이동하는 다리의 골반은 뒤에서 앞으로 회전하며 어깨는 그와 반대 방향으로 앞에서 뒤로 움직인다.

3.3.1 상체의 움직임

(그림 5)는 팔의 동작과 상체의 움직임을 나타내는 것이다. (그림 5(a))는 팔의 각도로 어깨와 팔꿈치의 초기값은 식(1)과 같이 팔의 어깨와 몸 중심과 이루는 각  $\theta_{Su\_Sh}$ ,  $\theta_{Sw\_Sh}$ 와 팔꿈치의 각  $\theta_{Su\_El}$ ,  $\theta_{Sw\_El}$ 은 서로 동일하다. 상체는 (그림 5(b))처럼 몸의 중심을 각도  $\rho$ (3° ~ 5°)만큼씩 앞과 뒤로 회전하면서 움직인다.

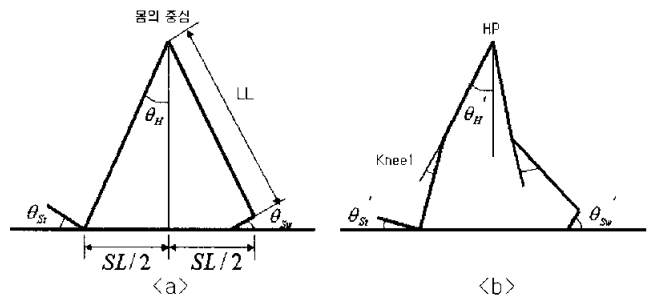
$$\theta_{Su\_Sh} = \theta_{Sw\_Sh} = \theta_{Su\_El} = \theta_{Sw\_El} \quad (1)$$



(a) 팔의 각도 (b) 상체의 움직임  
(그림 5) 팔과 상체의 동작

3.3.2 하체의 움직임

걷기 동작을 생성하기 위해서 몸의 중심을 기준으로 지면에 접촉하여 몸의 중심을 지탱하는 다리(Swing Leg)와 지면에서 떨어져 이동하는 다리(Swing Leg)의 지면과 이루는 각도를 이용하여 (그림 6(a))와 같이 초기치를 설정한다[3][19].



(그림 6) 다리의 동작

여기서 걷기 동작을 위해 필요로 하는 매개변수인 걸음폭(Step Length)과 다리길이(Leg Length)를 이용하여 엉덩이의 각도인  $\theta_H$ 를 산출한다. 그리고 식(2)와 같이 지면에 접촉하여 몸의 중심을 지탱하는 다리와 지면에 떨어져 이동하는 다리의 지면과 이루는 각도인  $\theta_{Sl}$ ,  $\theta_{Sw}$ 의 초기치는  $\theta_H$ 와 동일하게 설정한다.

$$\theta_H = \theta_{Sl} = \theta_{Sw} \quad (2)$$

기본 걷는 동작 생성[3][19][20]은 걸음폭(Step Length), 걸음속도(Walking Speed), 신체길이(Body Height), 한 주기 동안 걸음걸이 반복 횟수(Step Frequency) 등의 매개변수들을 필요로 한다. 걷기 동작의 속도는 식(3)과 같이 걸음걸이 폭과 주기를 통해 얻어진다.

$$V(m/min) = StepLength(m/steps) * StepFrequency(steps/min) \quad (3)$$

또한 신체 길이에 따라 걸음폭과 걸음 주기가 달라지므로 걸음폭(Step Length)의 산출은 식(4)이고, 걸음걸이 반복 횟수(Step Frequency)는 식(5)와 같다.

$$StepLength = \sqrt{a * V * body\ height} \quad (4)$$

$$StepFrequency^2 = \sqrt{\frac{V}{a * body\ height}} \quad (5)$$

여기서,  $a$ 는 식(6)과 같이 기본 걸음폭인 SSL(Standard Step Length), 기본 걸음주기인 SSF(Standard Step Frequency) 그리고 기본 신체길이인 SBH(Standard Body Height)로 산출한다[3][19].

$$a = \frac{SSL}{SSF * SBH} \quad (6)$$

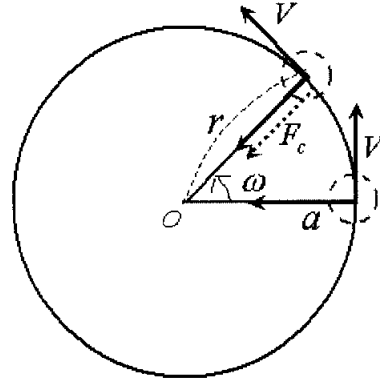
본 논문에서는 골반과 이동하는 다리의 움직임 궤적을 쉽게 제어할 수 있고 자연스러운 이동 궤적의 곡선을 산출하기 위해 큐빅 스플라인(Cubic Spline) 곡선 방법을 이용한다. 또한 지면에서 떨어져 이동하는 다리의 발목 위치점은 주어진  $\theta_{Sw}$ 와 이동 궤적을 통해 산출하고, 발의 위치점은 주어진  $\theta_{Sw}$  ( $\theta_{Sr}$ )를 가지고 자연스러운 발의 움직임을 결정한다. 무릎의 위치점은 다리 길이와 골반의 위치 그리고 발목(발끝)의 위치로부터 역운동학(Inverse Kinematics)을 적용하여 산출한다.

#### 4. 지형과의 마찰계수를 근거로 한 걷기 동작 분석

실세계에서 사람들의 걷기 동작을 살펴보면, 지면의 성질에 따라 걸음걸이의 모습은 차이가 있다. 즉, 지면이 빙판인 경우 걸음폭을 줄이면서 미끄러지지 않도록 천천히 걸음을 옮기고, 진흙인 경우 지면으로부터 발이 떨어지는 시간이 길어지며 걸음 걸이가 무거워진다. 이러한 지면의 성질에 따른 사람의 걸음걸이 변화는 지면의 마찰계수와 무관하다고 할 수 없다. 본 논문에서는 지면 성질을 마찰계수로 간주하고 이를 근거로 한 마찰력을 분석한다. 마찰력은 물체가 다른 물체의 표면에 접하여 움직이려고 할 때, 또는 움직이고 있을 때 그 운동을 저지하려는 힘이 접촉면을 따라 작용하는 저항력으로 마찰계수와 앞으로 나아가려는 추진력이 필요하다. 따라서 추진력을 구심력으로 근사표현하고 이를 마찰계수와 결합하여 지면의 성질에 따라 실세계 사람의 걸음걸이 모습처럼 캐릭터의 걷기 동작을 생성하는 방법을 제안한다.

지면과 마찰계수의 관계는 마찰이 없으면 움직일 수가 없듯이 마찰계수가 작을수록 얼음과 같이 미끄러운 지면에 가깝고, 마찰계수가 높을수록 거친 지면의 성질을 가진다. 본 논문에서는 마찰계수가 0.1일 때 가장 미끄러운 지면으로 가정하여 최소 마찰계수로 정하고, 최대 마찰 계수를 1.0으로 정하여 지면의 마찰계수의 범위를 0.1과 1.0사이로 정의한다. 또한 걷는 한 주기 동안에 지면과 접촉하는 발바닥의 면적이 다르므로 마찰계수를 지면에 닿는 발의 면적에 따라 변화량을 주어 적용한다.

실제 사람의 이동 동작은 인체의 골반으로부터 움직임이 시작된다. 즉 걸을 때 다리의 동작이나 상체의 움직임은 골반을 중심으로 동작이 이루어지므로 원운동과 유사하다. (그림 7)에서 물체가 원운동이나 곡선운동을 할 때 원의 중심 또는 곡선의 중심점을 향하여 작용하는 힘이 구심력으로 식(7)과 같으며 이를 지면의 성질에 따른 걷기 동작의 움직임에 활용한다.



(그림 7) 구심력

$$F_c = \frac{mV^2}{r} \quad (7)$$

여기서 원운동의 구심력과 걷기 동작의 움직임과의 상호연관성을 살펴본 결과, 구심력에서 원운동의 반지름인  $r$ 은 다리길이에 대응시키고, 원호상의 속도( $V$ )는 걷기 동작의 평균속도에, 또한 등속 원운동의 질량( $m$ )은 전신의 몸무게에 대응시킬 경우 비교적 용이하게 마찰을 도입한 걷기 동작의 근사적인 분석이 가능함을 알 수 있었다. 이 때의 무게중심( $O$ )은 골반의 위치로 대응시킨다.

이 과정에서 도입된 가정을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 원호상의 속도를 지면과 수평방향으로의 등속도 운동으로 근사적으로 표현하여 골반의 평균속도( $V$ )로 사용한다.

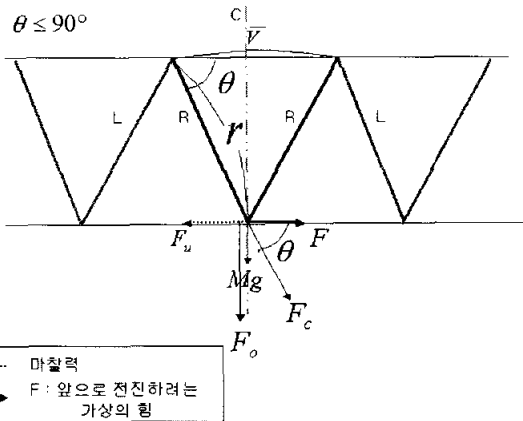
둘째, 등속원운동의 질량( $m$ )을 전체의 몸무게( $M$ )과 같다고 설정하고, 무게중심( $O$ )은 캐릭터의 골반으로 정한다.

세째, 원운동의 반지름인  $r$ 을 골반(Pelvis)의 위치와 발목(Ankle)의 위치의 최단거리로 사용한다.

##### 4.1 무게 중심이 뒤에 있을 경우

(그림 8)은 무게 중심을 캐릭터의 골반위치로 간주하였기 때문에 무게중심인 골반이 C지점을 기준으로 뒤에 있을 경우를 보여주는 그림이다. 즉, 각  $\theta$ 가  $90^\circ$  보다 작은 경우이다. 여기서, 각  $\theta$ 는 골반의 위치점과 지면을 지탱하는 다리의 발목을 연결한 선분이 지면과 서로 이루는 각도이고,  $r$ 은 골반에서 발목 위치점까지의 최단 거리로 다리 길이를 말한다.

구심력( $F_c$ )는 앞으로 나아가려고 하는 힘( $F$ )과 수직방향으로 작용하는 힘( $F_o$ )으로 분해된다. 이로부터 힘  $F$ 는



(그림 8) 무게 중심이 뒤에 있는 경우 ( $\theta \leq 90^\circ$ )

$$F = \frac{mV^2}{r} \cdot \cos \theta \quad (8)$$

이 된다.

마찰력( $F_\mu$ )은 수직방향의 힘의 총합  $F_V$ 에 의해 발생하므로 중력방향으로 일정하게 작용하는 힘( $M \cdot g$ )과 구심력( $F_c$ )을 분해하면 얻어지는 수직방향의 힘( $F_o$ )을 합하면 된다.

$$F_V = Mg + \frac{mV^2}{r} \cdot \sin \theta \quad (9)$$

위의 산출된 힘을 통해 마찰력  $F_\mu$  구하면

$$F_\mu = \mu F_V = \mu \cdot (Mg + \frac{mV^2}{r} \cdot \sin \theta) \quad (10)$$

이다.

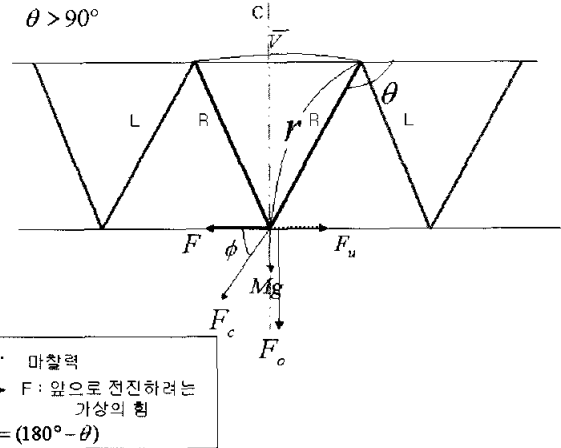
여기서, 전진하려는 힘  $F$ 와 반대로 작용하는 마찰력  $F_\mu$ 의 관계를 보면, 힘  $F$ 가 마찰력  $F_\mu$ 의 힘보다 커지는 순간 힘  $F$ 가 강해서 미끄러지는 현상이 발생한다고 볼 수 있다.

따라서 미끄러지는 조건은  $F_\mu < F$ 이고, 이를 정리하면 (식11)과 같다.

$$\mu \cdot (g + \frac{V^2}{r} \cdot \sin \theta) < \frac{V^2}{r} \cdot \cos \theta \quad (11)$$

#### 4.2 무게 중심이 앞에 있을 경우

걷는 한 주기 동안에 골반의 위치가 최대가 되는 지점인 C보다 골반의 위치(무게 중심)가 앞에 있는 경우에 대해서 힘의 관계를 표현하면 (그림 9)와 같다. 여기서, 각  $\theta$ 는 골반의 위치점과 지면을 지탱하는 다리의 발목을 연결한 선분이 지면과 이루는 각도를 말하고,  $r$ 은 골반에서 발목 위치



(그림 9) 무게 중심이 앞에 있을 경우( $90^\circ < \theta$ )

점까지의 최단 다리 길이이다. (그림 9)는 지면을 지탱하는 다리의 골반과 발목의 위치 점을 연결한 선분이 지면과 이루는 각도  $\theta$ 가  $90^\circ$  보다 큰 경우로, (그림 8)에서와 같이 각  $\theta$ 가  $90^\circ$  보다 작은 경우와 반대 방향으로 힘( $F$ )가 작용하게 되므로 식 (11)과 동일하다.

따라서 걷는 한 주기 동안에 미끄러지는 힘의 조건은  $F_\mu < F$ 이고 이를 정리하면 식 (12)와 같고, 이를 이용하여 마찰계수가 변화될 때마다 넘어지지 않는 조건(매개변수)들을 산출할 수 있다.

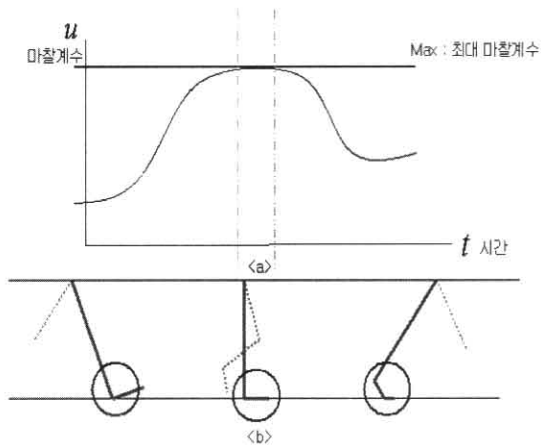
$$\mu \cdot (g + \frac{V^2}{r} \cdot \sin \theta) < \frac{V^2}{r} \cdot |\cos \theta| \quad (12)$$

#### 4.3 마찰 계수와 시간, 각도와와의 관계

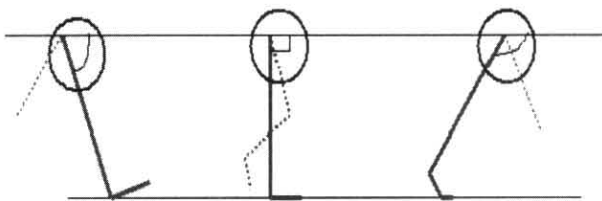
걷는 동작의 한 주기 동안의 마찰계수는 시간에 대하여 지면에 접촉하는 발이 지면과 닿는 면적이 다르기 때문에 마찰계수를 다르게 적용한다. 이에 따라 본 논문에서는 마찰계수가 0.1일 때 가장 미끄러운 지면으로 가정하여 최소 마찰계수로 정하고, 최대 마찰계수를 1.0으로 정하여 마찰계수의 범위를 0.1과 1.0사이로 정의한다.

이러한 걷기 동작의 한 주기동안에 지면을 지탱하는 발이 지면에 접촉하는 발바닥의 면적에 따라 마찰계수의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

(그림 10)은 한 주기의 걷기 동작을 하는 과정으로 시간에 따라 변하는 마찰계수와 지면을 지탱하는 다리의 모습을 표현한 것이다. 즉, (그림 10(a))는 걷는 한 주기 동안의 시간에 따라 변하는 마찰계수를 그래프로 표현한 것이고, (그림 10(b))는 지면을 지탱하는 다리에 대해서 지면에 접촉되는 발의 모습을 표현한 것이다. (그림 10)에서 보듯이, 한 주기내에서 걷기 동작의 시작부분에서는 지면과 접촉하는 발의 면적이 적기 때문에 마찰계수가 최소이고, 발이 지면과 접촉하는 부분의 면적이 가장 클 때는 무게중심이 가운데 지점인 경우로 이때 최대 마찰계수를 가지게 된다.



(그림 10) 발의 면적에 따른 마찰계수와 시간의 관계



(그림 11) 시간에 따른 각도의 변화

그리고 (그림 11)은 위의 (그림 10(a))에서 마찰계수와 시간과의 관계에 따라 걷는 한 주기동안 지면을 지탱하는 다리의 발목과 골반 위치점과의 최단 거리 선분이 지면과 이루는 각  $\theta$ 의 변화를 나타낸 것이다. 따라서 (그림 10)과 (그림 11)에서 보듯이 한 주기내에서 마찰계수가 최대인 경우는 무게 중심이 가운데 지점에 위치한 경우로 이때 지면에 닿는 발의 면적은 최대이고 각  $\theta$ 는  $90^\circ$ 를 이룬다. 마찰 계수가 최소인 지점은 걷기 시작하는 부분으로 지면에 닿는 발의 면적은 최소이고 각  $\theta$ 는  $90^\circ$ 보다 작은 각을 이룬다.

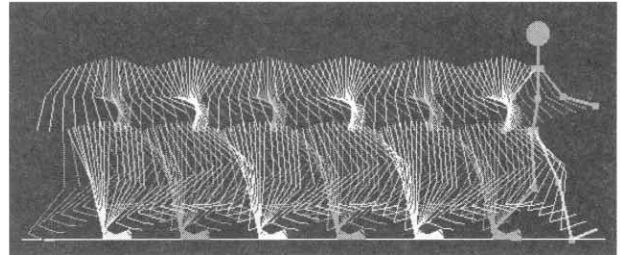
### 5. 실험 결과 및 분석

앞에서 제시한 기본 걷기 동작 계획에 의해 생성된 동작으로 지면의 성질인 마찰계수를 고려하여 걷기 동작을 실험한 환경과 결과에 대해 살펴본다.

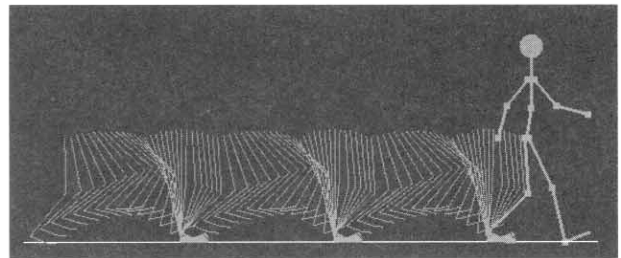
본 연구의 구현 환경은 PentiumIII-700급 PC에서 Windows 2000의 운영체제, Microsoft Visual C++ 6.0을 사용하였고 그래픽 라이브러리 OpenGL을 통해 실험환경을 구현하였다.

우선, 기본 걷기 동작을 생성하기 위해서 걸음폭, 걸음속도, 신체길이, 걸음길이 반복 횟수 등의 매개변수들을 필요로 한다. 이 매개변수들과 앞에서 정의한 기본 걷기 동작 계획을 통해 속도는 83.33m/min, 걸음폭은 0.33m/steps으로 설정하고, 마찰력이 없는 평지에서 걷기 동작을 표현한 결과가 (그림 12)이다. 또한 (그림 13)은 한 주기 동안 한쪽 다리가 지면에 접촉하여 몸의 중심을 지탱하는 단계와 다른

쪽 다리는 지면에서 떨어져 이동하는 단계로 나누어지는데, 걷는 동안에 오른쪽 다리가 움직이는 동작을 표현한 것이다.



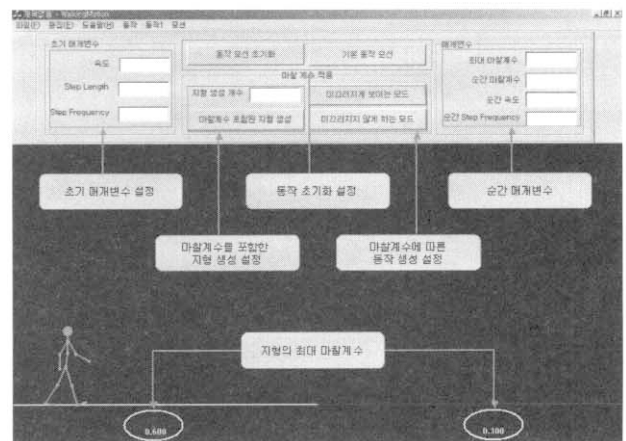
(그림 12) 전신의 움직임



(그림 13) 오른쪽 다리의 움직임

일반적인 캐릭터의 걷기 동작은 지면의 성질을 고려하지 않았기 때문에 일정한 보폭이나 일정한 속도, 또는 같은 모습으로 걷는 움직임을 생성한다. 하지만 지면의 성질에 따라 걷는 모습은 다르다.

따라서 본 논문에서 제안한 지형의 성질에 적응적인 조건을 기반으로 마찰계수에 따라 미끄러짐 현상이 발생하지 않도록 속도, 걸음폭나 걸음반복횟수 등의 매개변수를 조절하여 지형 성질에 적응하며 자연스럽게 걷는 움직임을 생성하였다. 이러한 지형의 성질인 마찰계수에 근거하여 걷기 동작의 변화를 살펴보기 위한 실험 구현 환경의 인터페이스는 (그림 14)와 같다. (그림 14)의 실험 구현 환경을 보면, 초기 매개변수 설정을 통해 걷는 동작에 필요한 매개변수를 사용자가 설정할 수 있도록 하고, 마찰계수를 포함한 지형을 랜

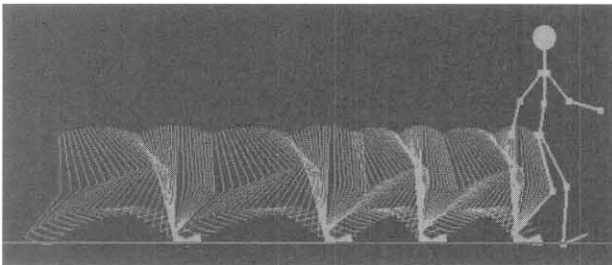


(그림 14) 실험 화면 GUI

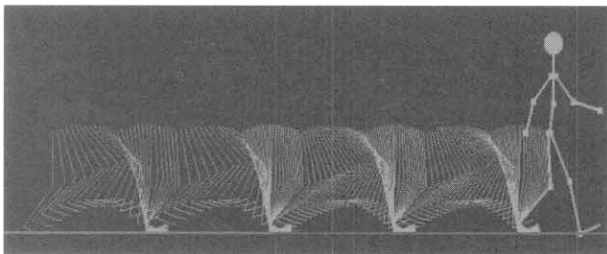
넘하게 생성할 수 있도록 지원하여 마찰계수에 따른 동작의 변화를 확인할 수 있도록 하였다. 또한 걷는 동안 변화되는 순간 매개변수에 대해서 확인할 수 있도록 하였다.

마찰계수는 지면의 성질과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 4장에서 제시한 것과 같이 0.1에서 1.0 사이로 정의하였고, 이를 지면의 성질로 적용하였다. 마찰계수는 지면의 접촉되는 면적에 따라 변화함으로써 지면에 접촉하는 발의 면적을 함께 고려하였다.

지면의 성질에 대해서 속도는 83.33m/min, 걸음폭은 0.33m/steps으로 설정하고, 미끄러지는 식(11-12)를 이용하여 지면의 성질을 반영한 마찰계수에 따라 미끄러지는 현상을 검사하였다. 이 때 미끄러짐 현상이 발생되면 지면에 적응적으로 속도나 걸음폭, 주기 등의 매개변수를 자동 조절되어 미끄러지지 않고 자연스럽게 움직이는 동작을 생성하도록 하였다. (그림 15-16)는 마찰계수가 부여된 지형에서의 걷는 동작을 표현한 것이다. (그림 15)는 (그림 12)와 같이 걷기 동작을 유지하다가 미끄러지는 조건이 발생하여 동작의 매개변수가 자동 조정되어 새롭게 걷기 동작을 생성한 결과이다. 이때 동작의 매개변수인 걸음반복횟수는 그대로 유지하면서 걸음폭은 전의 동작보다 좁아지고, 이에 따라 걸음속도는 느려진 동작을 취한다. (그림 16)은 (그림 15)처럼 걷기 동작을 유지하다가 미끄러지는 조건이 발생하여 동작의 매개변수가 자동 조정되어 새롭게 걷기 동작을 생성한 결과이다. (그림 16)은 걸음폭은 계속 유지되면서 걸음반복횟수가 많아지고 걸음속도는 빠른 동작을 취한다.



(그림 15) 마찰계수에 따른 걸음폭의 변화



(그림 16) 마찰계수에 따른 걸음주기(반복횟수)의 변화

<표 1>은 초기값으로 속도는 83.33m/min, 걸음폭은 0.33m/steps으로 설정하고, 마찰계수가 변화됨에 따라 미끄러지는 현상을 검사하여 걸음폭을 고정하고, 미끄러지는 현상이 발생하면 미끄러지지 않기 위한 최대 속도를 산출한 결과이다.

<표 1> 마찰계수에 따른 속도 변화

| 마찰계수 | 속도(m/min) | 미끄러지는 경우 | 미끄러지지 않는 최대속도(m/min) |
|------|-----------|----------|----------------------|
| 0.1  | 83.33     | 있음       | 141.66               |
| 0.2  | 83.33     | 있음       | 199.99               |
| 0.3  | 83.33     | 있음       | 258.32               |
| 0.4  | 83.33     | 있음       | 308.32               |
| 0.5  | 83.33     | 있음       | 349.98               |
| 0.6  | 83.33     | 있음       | 374.98               |
| 0.7  | 83.33     | 없음       | 449.98               |
| 0.8  | 83.33     | 없음       | 499.98               |
| 0.9  | 83.33     | 없음       | 533.31               |
| 1.0  | 83.33     | 없음       | 566.64               |

## 6. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 가상현실이나 게임내에서의 캐릭터 걷기 동작을 표현하는데 있어서 지면의 성질과의 마찰계수를 고려하여 매개변수를 산출하고, 지면의 성질에 따른 적응적인 동작을 생성하는 방법을 제안하였다.

기본 걷기 동작을 생성하기 위해 소수의 매개 변수를 사용하였으며 좀 더 자연스러운 다리를 표현하기 위해 발의 중간 지점을 추가하고, 어깨와 골반의 자세한 움직임을 추가하여 상체의 움직임에 대해서도 자연스러운 동작을 표현하였다. 이러한 기본 걷기 동작 자세를 기반으로 하여 적은 매개 변수로 주어진 지면 성질에 따른 적응적인 동작을 생성하였다. 즉, 지면 성질인 마찰계수와 구심력을 마찰력으로 분석하여 미끄러지는 조건을 정의하였고, 그 조건을 이용하여 미끄러지지 않게 속도, 걸음폭 그리고 걸음주기 등의 매개 변수를 자동 조절하여 미끄러지지 않고 자연스럽게 지형에 적응적인 동작을 생성함을 살펴보았다.

앞으로 다양한 유형의 지형, 계단이나 경사면이나 굴곡이 있는 언덕 등에 따라 좀 더 사실적인 걷기 동작 생성, 달리기나 점프 등의 동작이 실시간으로 적응적인 동작을 생성할 수 있도록 연구되어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Bruderlin and T. Calvert. "Goal-directed, Dynamic Animation of Human Walking." In Computer Graphics SIGGRAPH 89 Conference Proceedings, pages 233-242, 1989.
- [2] 박기주, 백성민 외 2명, "3차원 게임 애니메이션을 위한 모션 캡처 데이터", 동계 한국 게임학회, pages 348-352, 2002.
- [3] "CG 애니메이션", 정보과학회지 제17권 제2호 통권 제117호 1999.02.
- [4] H.Ko and N.I.Badler, "Animating Human Locomotion in Real-Time Using Inverse Dynamics", IEEE Computer Graphics & Applications, pages 50-59, 1996.
- [5] R.Boulic, R.Mas, and D.Thalmann, "A Robust Approach for



- the Center of Mass Position Control with Inverse Kinetics”, Journal of Computers and Graphics, 20(5), 1996.
- [6] R.Boulic and D.Thalmann, “Combined Direct and Inverse Kinematic Control for Articulated Figures Motion Editing”, Computer Graphics Forum, 11(4):189-202, 1992.
- [7] F.Multon, L.France, M-P.Cani-Gascuel, and G.Debunne, “Computer Animation of Human Walking”, a Survey. Journal of Visualization and Computer Animation, pages 10:39-54, 1999.
- [8] F.M.Silva, J.A.Tenreiro Machado, “Kinematic Aspects of Robotic Biped Locomotion Systems”, Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS’ 97, Vol. 1, pages 266-271, 8-13 1997.
- [9] N.Badler, C.Phillips and J.Zhao, “Interactive Realism Articulated Figure Manipulation Using Multiple Kinematic Constraints”, In Proceedings, Symposium on Interactive 3D Graphics, pages 245-250, 1990.
- [10] F.Faure, G.Debunne, M-P.Cani-Gascuel, F.Multon, “Dynamic Analysis of Human Walking”, Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pages 95-107, 1997.
- [11] J. Lee, J. Chai, P. Reitsma, J. Hodgins, and N. Pollard, “Interactive Control of Avatars Animated with Human Motion Data”, ACM Transactions on Graphics(SIGGRAPH 2002), 21:3, 491-500, 2002.
- [12] S.I.Park, H.J.Shin, and S.Y.Shin, “On-line Locomotion Generation On Motion Blending”, In Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2002.
- [13] A.Bruderlin and T.Calvert, “Goal-directed, Dynamic Animation of Human Walking”, In Computer Graphics SIGGRAPH Conference Proceedings, pages 233-242, 1989.
- [14] M.Unuma, K.Anjyo, and R.Takeuchi, “Fourier Principles for Emotion-Based Human Figure Animation”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 91-96, 1995.
- [15] M.F.Cohen, “Interactive Spacetime Control for Animation”, In Processings of ACM SIGGRAPH, pages 293-302. Addison Wesley, July 1992.
- [16] J.Lee and S.Y.Shin, “A Hirearchical Approaching to Interactive Motion Editing for Human-like Figures”, Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH 1999), pages 39-48, 1999.
- [17] J.T.Ngo and J.Marks, “Spacetime Constraints Revisited”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 343-350, Anaheim, California, August 1993. Addison Wesley.
- [18] 최지호, 백두원, 정분열, “경사면 위에서의 걷기 동작을 위한 리타겟팅 기법”, 한국정보과학회, 2002.
- [19] Shih-kai Chung and James K. Hahn “Animation of Human Walking in Virtual Environments”, Institute for Computer Graphics School of Engineering and Applied Science, The George Washington University, pages 4-15, 1999.
- [20] Harold C. Sun and Dimitris Metaxas, “Automating gait animation”, Conference proceedings on Computer graphics, 2001
- [21] Sumner, R. W., O’Brien, J. F., Hodgins, J. K., “Animating Sand, Mud, and Snow”. To appear in Computer Graphics Forum, Vol. 18, No. 1. , 1999.
- [22] 송미영, 이금희, 엄기현, 김준태, 조형제, “걷기 움직임을 위한 전신의 기본 동작 계획”, 2003 동계학술발표 논문집, 한국게임학회, pages 243~248, 2003.
- [23] 이금희, 송미영, 조형제, “전신의 움직임을 표현한 캐릭터의 걷기 동작 생성”, 2002 추계학술발표 논문집, 멀티미디어학회, pages 466-469, 2002.
- [24] 한국 게임 산업 개발원, “가상현실과 게임”, 2002.
- [25] D. Baraff and A. Witkin, “Physically Based Modeling”, SIGGRAPH’99 Course Note pages D1-D32, 1999.
- [26] J.K., Hodgins, W.L. Wooten, D.C. Brogan, and J.F O’ Brien. “Animating human athletics.” In Proceedings of ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, pages 71-78, 1995.
- [27] A.Bruderlin and L.Williams. “Motion signal processing.” In Computer Graphics SIGGRAPH 95 Proceedings, pages 97-104, 1995.
- [28] Filipe M. Silva, J.A. Tenreiro Machado, “Kinematic Aspects of Robotic Biped Locomotion Systems”, Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS’ 97, Vol. 1, pages 266-271, 8-13 1997
- [29] R. Boulic and D. Thalmann. “Combined Direct And Inverse Kinematic Control For Articulated Figures Motion Editing.” Computer Graphics Forum, 11(4):189-202, 1992.
- [30] M. Unuma, K. Anjyo, and R. Takeuchi. “Fourier Principles For Emotion-Based Human Figure Animation.” In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 91-96, 1995



### 이금희

e-mail : moor5186@kocca.or.kr

2001년 한신대학교 수학과 졸업(이학사)

2003년 동국대학교 멀티미디어공학과(공학 석사)

2004년~2005년 한국게임산업개발원 게임 품질평가연구원

2005년~현재 한국문화콘텐츠진흥원, 우수기술이전 및 게임품질 평가

관심분야: 컴퓨터 비전, 게임



### 송 미 영

e-mail : songmy@swc.ac.kr

1995년 안양대학교 전자계산학과 졸업(학사)

1998년 동국대학교 컴퓨터공학과 대학원  
(공학석사)

2004년 동국대학교 컴퓨터공학과 대학원  
(박사과정)

2004년~현재 수원여대 멀티미디어통신과 전임강사

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 게임



### 조 형 제

e-mail : chohj@dgu.edu

1973년 부산대학교 전자공학과 졸업(학사)

1975년 한국과학기술원 전기·전자공학과 대학원(공학석사)

1986년 한국과학기술원 전기·전자공학과 대학원(공학박사)

1986년~현재 동국대학교 멀티미디어학과 교수

관심분야 : 멀티미디어 정보처리, 컴퓨터비전, 컴퓨터 그래픽스, 게임