

다양한 지형에서의 적응적인 걷기 동작 생성

(Generation of Adaptive Walking Motion for Uneven Terrain)

송 미 영 [†] 조 형 제 ^{**}
(MiYoung Song) (HyungJe Cho)

요 약 대부분의 3차원 캐릭터 애니메이션에서는 모션 캡처 장비를 통해서 포착된 동작 데이터를 이용하여 다양한 지형상에서 캐릭터가 걷는 동작을 표현한다. 이러한 동작 포착 데이터는 실제 사람과 같이 움직이는 동작들을 자연스럽게 표현할 수 있으나, 만약 다양한 지형에 대한 움직이는 동작이 표현할 경우, 지형의 유형에 따라 모든 동작을 캡처하여야 하고, 얻어진 동작 데이터를 다른 유형의 캐릭터에 적용할 경우 동작 데이터를 다시 얻거나 기존 동작 데이터를 재편집해야 하는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 적은 매개변수들을 사용하여 평지면, 경사면, 계단면 그리고 굴곡면 등 다양한 지형에서의 적응적인 걷는 동작을 생성하기 위한 방법과 골반과 이동하는 다리의 움직임 궤적을 산출하는 방법을 제안한다. 이 방법에서는 캐릭터의 신장이나 걷는 속도, 걸음폭 등의 매개변수들을 조절하여 다양한 걸음걸이를 생성할 수 있으며 역운동학(Inverse Kinematics) 개념을 적용하여 관절들의 위치나 각도를 산출하고 관절의 이동 궤적을 계산하기 위해 큐빅 스플라인 곡선을 활용한다.

키워드 : 걷기 동작, 이동 궤적, 역운동학, 큐빅 스플라인

Abstract Most of 3D character animation adjusts the gait of their characters for various terrains, using motion capture data through the motion capture equipments. This motion capture data can be naturally presented as real human motions, which are to be adjusted according to the various types of terrain. In addition, there would be a difficulty applying motion capture data for other characters in which the motion data will be captured again or edited for the existing motion data.

Therefore, this paper proposes a method that is to generate walking motion for various terrains, such as flat, inclined plane, stair, and irregular face, and a method that is to calculate the trajectory of the swing leg and pelvis. These methods are able to generate various gaits controlled by the parameters of body height, walking speed, stride, etc. In addition, the positions and angles of joint can be calculated by using inverse kinematics, and the cubic spline will be used to calculate the trajectory of the joint.

Key words : walking motion, moving trajectory, inverse kinematics, cubic spline

1. 서 론

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. 컴퓨터 성능의 발달과 저가격화로 인해 동작 제어 기법을 구현하는데 최대의 걸림돌이라 할 수 있을 계산 시간

의 증가에 따른 생산성 저하의 우려가 낮아지고 있는 것도 이러한 추세를 뒷받침하고 있다. 또한 모션 캡처 기술 역시 아직까지는 기술적으로 해결해야 할 난제가 많이 있지만 다른 기법에서는 얻을 수 없는 여러 가지의 장점들로 인해 점점 그 사용 빈도가 늘어나고 있다[1].

이러한 동작 제어 기법을 통해 가상환경의 지형에 따라 적응적인 캐릭터의 동작을 표현하는 데는 한계가 있다. 즉, 대부분의 가상환경에서 캐릭터의 걷는 움직임은 일정하고 단조로운 동작만을 반복하여 표현하고 있어 관찰자로 하여금 지루함을 느끼게 하고, 지형의 조건이나 형태에 따라 캐릭터의 발끝이 지면에 스며들거나 떠 있는 등의 부자연스러운 동작으로 인해 사실감을 저하시킨다.

따라서 본 연구는 전신의 움직임 자세[2]를 바탕으로

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

† 학생회원 : 동국대학교 컴퓨터공학과
smy@dgu.edu

** 비 회 원 : 동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과 교수
chohj@dgu.edu

논문접수 : 2003년 2월 6일

심사완료 : 2003년 8월 11일

적은 매개변수와 역운동학을 이용하여 걷기 동작을 생성하고 평지면, 경사면, 계단면 그리고 굴곡면 등과 같은 지형의 유형에 따라 서로 다른 기법을 적용하여 동작을 생성하는 것이 아니라 어떠한 지형이든지 적응적인 걷기 동작을 생성할 수 있는 간단하고 효율적인 방법을 제안한다. 즉, 걷는 동작시 다양한 지형을 고려할 수 있는 다리 동작에 대한 *MoDS*와 *PoDS*의 동작 계획 방법과 3차 큐빅 스플라인을 활용한 다리와 골반의 이동 궤적을 산출하는 방법과 지형과의 충돌을 회피할 수 있도록 다리의 이동 궤적을 계획하는 방법 등을 통해 지형 변화에 따른 적응적인 걷기 동작을 생성한다.

본 연구의 2장에서는 동작 제어 기법의 관련된 연구들을 살펴보고 3장에서는 다양한 지형에 따른 걷기 동작 생성을 위한 처리 과정 및 캐릭터 모델 구조에 대해, 4장은 기본 걷기 동작을 위한 다리의 동작 계획에 대해 설명하고 5장과 6장은 다양한 지형에 적응적인 걷기 동작을 생성하기 위한 동작 계획을 정의하며 또한 다양한 지형에서 충돌할 경우 걷기 동작의 보정에 대해 7장과 8장에서 살펴보고 9장에서는 제안한 다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작 계획 방법을 통해 생성된 구현 결과를 확인하고 10장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

3차원 캐릭터 애니메이션의 제작에 있어서 캐릭터의 생명감을 표현하기 위해 물리적 법칙을 비롯한 일련의 규칙에 의해 자동 혹은 반자동적으로 동작을 생성하는 기법을 적용하는데 이를 통칭하여 동작 제어 기술이라 한다[1]. 동작 제어 기법은 크게 키프레임(Key-Frames), 운동학(Kinematics), 역학(Dynamics) 그리고 동작 편집(Motion Editing) 방법 등으로 분류할 수 있다.

2.1 키프레임 기법(Key-Frame Techniques)

키프레임 기법은 시간축에 따라 캐릭터의 각 관절의 굴절 각도와 캐릭터 자체의 공간적 위치 등을 애니메이터가 수작업을 통해 동작을 제어하는 방법으로 키프레임 간의 연결 동작을 위해 보간 동작의 생성이 필요하다.

키프레임 기법에 의한 캐릭터 동작 생성은 전문적인 수작업에 의존하는 부분이 많기 때문에 제작시간이 길고 애니메이터가 인간을 비롯한 실제 생물체의 움직임을 잘 이해하고 있어야 하며 자칫하면 부자연스럽거나 비현실적인 움직임이 생성될 수 있는 제약점을 지니고 있다. 그러나 동작 제작 개발이 상대적으로 쉽고 제작자가 캐릭터 동작의 미세한 부분까지 직접 제어할 수 있어 사람과 매우 유사하게 동작을 생성할 수 있다는 장점을 가지므로 아직까지 대부분의 캐릭터의 동작 제어를 위해 키프레임 기법으로 제작하고 있다[1].

2.2 운동학적 기법(Kinematics Techniques)

운동학적 기법은 키프레임(Key-Frames)을 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 운동학적 방법으로 산출하여 동작을 생성하는 방법이다[3-7].

운동학적 기법으로는 계층구조의 상위에 있는 관절을 조작하여 동작을 제어하는 전운동학(Forward Kinematics) 방법과 계층구조의 하위에 있는 관절을 조작하여 동작을 제어하는 역운동학(Inverse Kinematics) 방법이 있다. 전운동학적 방법은 제작자가 관절을 직접적으로 제어할 수 있으며 관절의 개수가 적을 때에는 아주 간단하고 손쉽게 작업할 수가 있으나 다중관절을 사용하는 경우는 복잡하고 힘겨운 작업이 된다. 그리고 역운동학적 방법은 다관절의 개수가 많을 때 작업하기 용이하지만, 관절을 직접적으로 제어하기 힘들기 때문에 세밀한 작업을 할 때 어려움이 따른다[1]. 전운동학적인 방법은 발이 지면에 침투하지 않도록 하기 위한 동작의 제한성(constraints)을 추가하기 어렵기 때문에 이를 해결하기 위해 역운동학적인 방법에서는 자코비안 행렬(Jacobian matrix) 등을 사용하여 주요 움직임 동작과 각도와와의 관계를 산출하기도 하며[3], 또한 좀더 사람과 유사하고 자연스러운 실제 움직임을 생성하기 위해 전운동학과 역운동학을 결합하기도 한다.

운동학적 기법은 구현이 쉽고 다관절체들을 정밀하게 제어할 수 있으며 계산 비용이 적게 들기 때문에 실시간 동작 생성에 적합하지만, 실제 사람과 같은 자연스러운 동작을 생성하기에는 부적합하고 키프레임 간의 연결 동작을 위한 보간 방법이 필요하다[3-7].

2.3 역학적 기법(Dynamics Techniques)

역학적 기법은 캐릭터 움직임의 중요 단계를 수작업에 의해 지정하는 키프레임 기법이나 운동학적 기법과 달리 뉴턴 법칙의 각속도와 각가속도, 회전력 등의 물리적인 역학과 일련의 규칙에 의해 동작을 생성하는 방법이다[3].

역학적 기법들로는 키프레임의 궤적(key-framed trajectories)을 예측하여 정의하지 못하는 운동학적인 기법의 문제점을 해결하기 위해 전역학과 역역학 등을 결합한 전·역역학(Forward and Inverse Dynamics) 방법[3,10,11]과 전체 연속 동작에서 시간에 따라 변하는 근육의 힘과 움직임을 계산하여 동작을 생성하는 시공간 제한성(Spacetime Constraints) 방법[3,13,15] 그리고 가상의 캐릭터가 가상환경에서 상호적인 동작을 효과적으로 취할 수 있는 컨트롤러(Controller) 방법[3,14] 등이 있다.

이러한 역학적 기법은 적은 조건만으로도 그 결과가 매우 사실적이며 자연스럽고 현실적인 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 하며 무엇보다 구체적이고 직접적인 제어가 불가능해 결과를 예측하기 어려워 자동화된 동작을 표현하기 어렵고 계산 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

2.4 동작 편집 기법(Motion Editing Techniques)

동작 편집 기법은 모션 캡처 장비에서 얻어진 데이터를 이용하여 사용자의 용도에 따라 서로 다른 동작들과 연결을 하거나 결합하는 등의 원하는 동작으로 재편집하는 방법이다[3].

이 방법은, 대표적으로 모션 블렌딩(Motion Blending)과 모션 와핑(Motion Warping(Displacement Mapping)), 시공간 제한성(Spacetime Constraint) 그리고 모션 리타겟팅(Motion Retargetting) 등이 있다.

모션 블렌딩 방법은 새로운 동작을 생성하기 위해 서로 다른 동작간의 보간 동작을 생성하기 위한 방법으로 동작 생성을 위한 데이터베이스가 필요하고, 액션 게임이나 스포츠 게임 등에서 자연스러운 동작들을 만들기 위해 적용한다[3,24,25]. 그리고 이 방법의 결과로 생성되는 동작의 정밀도는 미리 획득한 동작들의 데이터베이스의 양에 비례한다고 할 수 있다. 모션 와핑 방법은 전이함수(Displacement Mapping)라고도 하며, 이는 동작 신호의 전역성을 보존하고 일관성을 유지하면서 전이함수(displacement map)를 통해 지역적으로 동작신호를 변환하여 동작을 생성한다. 전이처리를 통해 원하는 동작의 결과를 얻을 때까지 반복적인 수행이 요구되며 또한 동작 결과에 대한 적절한 제어가 어렵다[3,18,19]. 시공간 제한성(Spacetime Constraint) 방법은 전체적인 동작을 동시에 고려하여 동작을 생성하는 것으로 사용자는 전체 동작상의 제한성을 기술할 수 있으나, 이러한 제한조건에 맞는 최적의 동작을 얻기 위한 해결책 등이 요구된다. 이 방법은 물리적인 실제 동작을 합성하여 동작을 생성할 수 있지만 많은 요소(factor)들을 필요로 하기 때문에 상호적인 편집을 적절하게 지원하지 못하며 최적의 동작 생성을 위한 해결책을 찾는 데 계산적 비용이 크다[3,13,15,23,25]. 모션 리타겟팅 방법은 캡처한 동작 데이터들을 신체 크기가 다르거나 다양한 유형의 캐릭터에 적용할 수 있도록 동작을 편집하는 방법이다. 따라서 하나의 동작 데이터를 자동으로 변형하여 다양한 캐릭터의 동작을 제작할 수 있다는 장점이 있으며 가장 최근에 게임이나 가상현실 분야에서 가장 많이 쓰이고 있는 방법이다[3,22,24].

위의 동작 제어 기법을 기반으로 평지면에서 걷는 동작외에 경사면이나 계단면 등과 같은 지형위에서 자연스러운 걷는 동작을 생성하는 연구들이 진행되고 있다. [논문11]에서는 계단 지형에서 최적의 골반 이동 궤적을 검출하기 위해 골반의 이동 경로를 윈도우로 나누고 이 윈도우내에서의 각가속도를 계산하여 각가속도의 변화가 가장 적은 지점을 최적의 골반 이동 궤적으로 선정한다. 그리고 지형과의 충돌을 고려하여 이동하는 다리의 이동 궤적의 산출은 베이지 곡선을 활용한다. 그러나 최적의 골반 이동 궤적을 산출하기 위해 골반의 이동 경로에 대해 매번 윈도우내의 각가속도 변화량을 계산하여야 하고, 또한 베지어 곡선은 제어점을 근사적으로 접근하기 때문에 지형과의 충돌을 피할 수 있도록 제어점의 재수정도 필요하다.

최근 연구가 활발한 모션 캡처 장비를 통해 실제 사람으로부터 포착한 자연스러운 동작 데이터를 활용하기 위한 것으로 [논문9]는 시상면의 각도를 이용하여 다양한 지형에서의 걷는 동작을 실시간으로 생성하는 방법을 제안하며 [논문22]는 간단하고 빠르게 캐릭터의 다리 길이가 달라져도 경사면에 적합한 동작을 표현할 수 있는 방법을 제안하고 있다. [논문24,25]는 울퉁불퉁한 지형이나 계단지형에서의 이동 동작을 생성하는 방법들을 제안하고 있으며 [논문25]는 적절한 개수의 동작들만으로도 울퉁불퉁한 지형 위에서 사용자가 지정한 경로를 따라가는 보행 및 조깅등의 이동 동작을 실시간에 빠르게 생성할 수 있는 방법을 제안하고 있다. 그러나 동작 포착 데이터를 이용하기 위해서는 정밀한 동작 움직임을 측정해야 하는 비용과 시간이 필요하고, 포착된 동작 결과의 사용에 있어서 포착과정 중의 잡음 등에 의해 생기는 거친 동작을 수정하거나 몇 개의 단위 동작을 결합하기 위해 많은 동작 데이터를 분석해야 하며 사후 편집 과정이 필요하다. 그리고 지형의 유형이 다양한 경우, 지형에 맞는 동작을 재포착하거나 포착된 동작을 보정하는 기법 등이 요구된다. 이러한 모션 캡처 장비를 이용해 얻어진 각 관절의 위치 정보와 각 정보로 이루어진 데이터를 직관적으로 사용자의 용도에 맞게 재수정하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 본 연구는 동작 포착 데이터에서 최적의 동작을 얻기 위한 비용과 시간을 줄일 수 있도록, 적은 매개변수와 기하학적인 정보만을 이용하기 때문에 빠르고 효율적으로 걷기 동작을 생성한다. 그리고 지형과의 충돌을 고려한 일관성 있는 골반과 다리 등의 이동 궤적을 위한 제어점을 선정하기 때문에 [논문11]과 같이 이동 궤적을 검출하기 위해 반복적인 계산을 요구하지 않으며, 또한 베지어 곡선은 제어점의 근사지점만 지나가기 때문에 충돌 회피를 보장할 수 없으므로, 제어점을

반드시 지나가는 큐빅 스플라인 곡선을 활용함으로써 지형 충돌의 문제를 보장할 수 있다.

3. 다양한 지형에서의 걷기 동작 생성 과정 및 캐릭터 모델 구조

다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작 생성의 처리 과정[그림 1]은 걷기 동작에 필요한 매개변수와 다양한 지형에 대한 정보를 기반으로 지형과의 충돌을 회피하도록 지형상에서의 MoDS 위치를 선정하고, 선정된 MoDS와 지형의 높이를 고려하여 PoDS의 위치를 선정한다. 그리고 이동하는 다리와 골반의 움직임 궤적을 산출하기 위해서 우선, 지형에 발끝이 스며드는 등의 충돌을 피할 수 있도록 제어점을 선정하여 이동 궤적을 구한다. 이러한 지형에 따라 산출된 움직임 궤적과 동작의 매개변수를 통해 다양한 지형에서의 적응적인 걷기 동작을 생성한다.

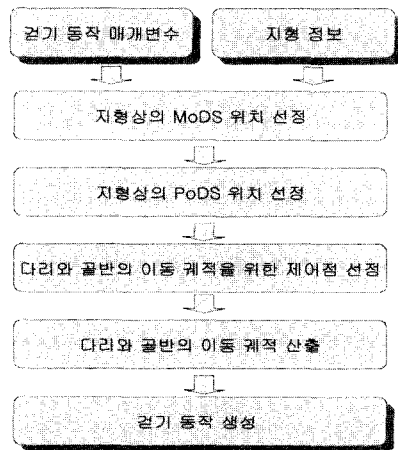
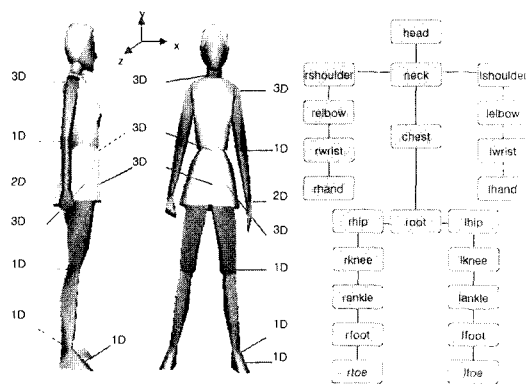


그림 1 걷기 동작 생성의 처리 과정



(a) 31 개의 자유도 (b) 다관절체 구조

그림 2 캐릭터 모델 구조

여기서 걷기 동작을 위한 캐릭터의 모델은 뼈대 (skeleton)들로 이루어진 다관절체로 구성한다. 이러한 다관절체는 서로 연결되어 있고, 또한 걷는 동작에서 발 끝의 움직임을 좀더 자연스럽게 표현하기 위해 발의 중간지점에 연결점을 추가한다. 그리고 각 관절의 연결점은 자유로운 회전을 위한 자유도를 가진다. 따라서 캐릭터 모델은 다관절체의 연결점이 15개, 회전을 위한 자유도 31개를 가진다[그림 2].

4. 다리 동작의 기본 계획

일반적인 걷기 동작의 한 주기는 한쪽 다리가 지면에 접촉하여 몸의 중심을 지탱하는 단계(Support Phase)와 다른 한쪽 다리는 한 주기동안 지면에서 떨어져 이동한 후 다시 지면에 접촉할 때까지의 단계(Swing Phase)로 이루어진다. 따라서 두 다리가 지면에 접촉한 상태(Double Support)에 있다가 한쪽 다리가 지면과 떨어져 이동하여 다시 두 다리가 지면에 접촉하는 상태가 될 때까지를 한 걸음(1 Walking Cycle) 동작으로 간주한다[3,10,11].

본 연구에서는 [논문2]에서 정의한 걸음걸이의 전신 자세를 기반으로 걷는 동작의 움직임을 생성한다. 다리의 걷는 동작을 생성하기 위한 매개변수로는 걸음폭 (step length), 다리길이(leg length), 걸음속도(walking speed), 신체길이(body height) 그리고 걸음반복횟수 (step frequency)등을 사용하며 걸음속도는 식 (1)과 같이 걸음폭과 걸음반복횟수 등으로 산출한다[10,11].

$$V(m/min) = StepLength(m) * StepFrequency(steps/min) \quad (1)$$

또한 신체길이나 걸음속도의 변화에 따라 걸음폭을 조절하는 식은

$$StepLength = \sqrt{a * V * body height} \quad (2)$$

이고, 여기서 a 는 표준신체길이에 따른 상수 값으로 식 (3)과 같이

$$a = \frac{SSL}{SSF * SBH} \quad (3)$$

표준걸음폭인 SSL(Standard Step length), 표준걸음 반복횟수인 SSF(Standard Step frequency) 그리고 표준신체길이(Standard Body Height)로 산출한 결과가 0.004이다[11].

그림 3(a)는 걷기 동작을 위한 초기 모습으로 두 다리의 간격을 최대 걸음폭으로 하여 θ_{H_0} 를 산출하고, 각 초기 각도는 식 (4)와 같다.

$$\theta_{H_0} = \theta_{SP_0} = \theta_{SW_0} \quad (4)$$

여기서, θ_{H_0} 는 골반을 중심으로 몸의 중심을 지탱하는 다리(Support Leg)가 최대로 뻗을 때의 각도, θ_{SP_0}

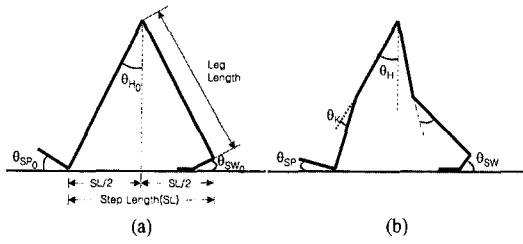


그림 3

는 지면과 몸의 중심을 지탱하는 다리와의 각도 그리고 θ_{SW} 는 이동하는 다리(Swing Leg)와 지면이 이루는 각도이다. 그림 3(b)와 같이 걷는 동작을 하는 동안 각 관절 위치와 각도는 역운동학(Inverse Kinematics) 방법으로 산출한다.

5. 다양한 지형에서의 걷기 동작 계획

한 걷는 주기를 그림 4에서 살펴보면, 두 다리가 지면에 접촉하는 상태가 2번 반복한다. 걷는 동안에 두 다리가 지면과 접촉하는 경우, 두 다리의 간격은 최대 걸음 폭으로 곧게 뻗은 상태이고 이때 골반의 위치는 가장 낮다. 또한 두 다리가 지면에 접촉한 상태에서 한쪽 다리가 지면과 떨어져 이동하여 다른 한쪽 다리를 교차하는 경우, 즉 두 다리가 지면에 접촉한 상태에서 다시 두 다리가 지면에 접촉하는 상태간의 중간 지점에서는 골반의 위치가 가장 높다.

따라서 걷는 동안에 골반의 위치가 가장 높은 지점과 낮은 지점을 각각 MoDS(Middle of Double Support)와 PoDS(Pelvis of Double Support)로 정의하고 이를 기반으로 다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작을 계획한다[그림 4]. 여기서 지면으로부터 MoDS의 높이는 다리길이와 같으며, PoDS의 높이는 두 다리가 최대 걸음 폭일 때의 높이에 해당한다.

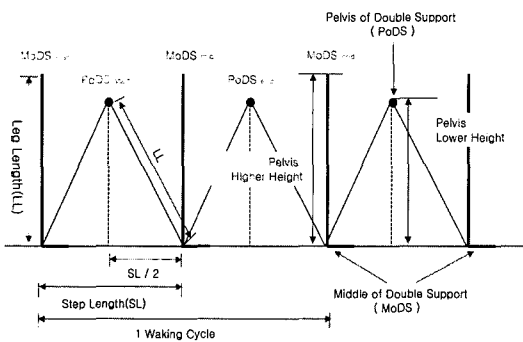


그림 4 걷기 동작 계획

5.1 MoDS의 위치 선정방법

다양한 지형에서의 적응적인 걷기 동작을 위해 우선, 지형에서의 MoDS 위치점을 선정한다. 한 걷는 주기 동안에서 걷기 동작 계획을 위한 지면에서의 MoDS 위치는 걸음폭의 간격으로 각각 MoDS의 시작지점 ($MoDS_{start}$), 중간지점($MoDS_{mid}$), 끝지점($MoDS_{end}$) 등을 설정한다[그림 4]. 여기서 $MoDS_{mid}$ 는 다음 걷는 주기에서 $MoDS_{start}$ 가 된다.

따라서 다양한 지형의 지면에서 MoDS들의 위치점을 결정하기 위한 방법은 다음 식 (5)와 같다.

$$MoDS_{start}(x, y, z) = (x_0, PlaneHeight, z_0)$$

$$MoDS_{mid}(x, y, z) = (MoDS_{start}(x) + StepLength, PlaneHeight, z_0)$$

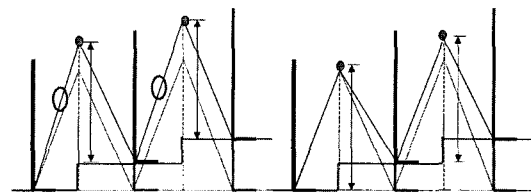
$$MoDS_{end}(x, y, z) = (MoDS_{mid}(x) + StepLength, PlaneHeight, z_0)$$

(5)

5.2 PoDS의 위치 선정방법

한 걷는 주기 동안에 두 MoDS의 위치에 따라 골반 위치가 가장 낮은 지점인 PoDS(Pelvis of Double Support)의 위치점을 결정한다. 여기서 $MoDS_{start}$ 와 $MoDS_{mid}$ 사이를 $PoDS_{start}$ 로 하고 $MoDS_{mid}$ 와 $MoDS_{end}$ 사이를 $PoDS_{end}$ 로 정의한다[그림 4].

지면으로부터 PoDS의 기준 위치를 두 MoDS의 중간 지점인 지면에서부터 선정하는 경우, 그림 5(a)와 같이 중간지점의 지면 높이로 인해 PoDS의 위치가 높아져서 걷는 주기 동안에 두 다리가 지면에 접촉하여야 하는 상태임에도 불구하고 다리가 지면에 비접촉되는 경우가 발생한다. 따라서 PoDS의 기준 위치 선정은 그림 5(b)와 같이 두 MoDS 중에서 지면의 위치가 낮은 MoDS를 기준으로 하여 PoDS의 위치점을 결정하며 이는 식 (6)과 같다.



(a) 지면의 높이를 기준 (b) 두 MoDS중 낮은 높이를 기준

그림 5 PoDS의 위치점 선정

$$PoDS_{start}(x, y, z) = (MID(MoDS_{start}(x), MoDS_{mid}(x)), MIN(MoDS_{start}(y), MoDS_{mid}(y)), z_0)$$

$$PoDS_{end}(x, y, z) = (MID(MoDS_{mid}(x), MoDS_{end}(x)), MIN(MoDS_{mid}(y), MoDS_{end}(y)), z_0)$$

(6)

6. 다양한 지형에서의 골반과 이동하는 다리의 움직임 궤적 계획

대부분의 걷기 동작에 대한 연구는 평지에서의 동작을 생성하고 또한 관절들의 이동 궤적은 sine 곡선이나 cosine 곡선 방법을 적용하여 산출한다. 이러한 sine이나 cosine 곡선 방법은 평지면과 굴곡이 없는 경사면 등의 지형에서는 관절들의 이동 궤적을 쉽게 산출할 수 있지만, 높이가 서로 다른 계단면이나 굴곡을 포함한 비정형화 지형인 경우 이동 궤적을 계산하기 위한 비용이 크며 자연스러운 움직임을 위한 이동 궤적을 제어하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 다양한 지형에 따라 골반과 이동하는 다리의 움직임 궤적을 쉽게 제어할 수 있고 자연스러운 이동 궤적의 곡선을 산출하기 위해 3차 큐빅 스플라인(Cubic Spline) 곡선 방법을 이용한다. 이러한 큐빅 스플라인 곡선은 3차 곡선인 경우에 가장 부드러운 곡선을 표현할 수 있고 제어점들을 반드시 통과하기 때문에 다양한 지형에서 지형과 충돌하지 않도록 이동 궤적을 위한 제어점들을 적절하게 선정한다면 자연스러운 걷는 동작을 생성할 수 있다.

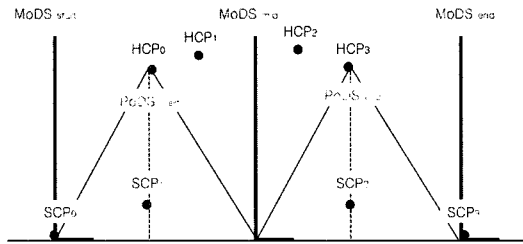


그림 6 이동 궤적을 위한 제어점 선정

6.1 골반의 움직임 궤적

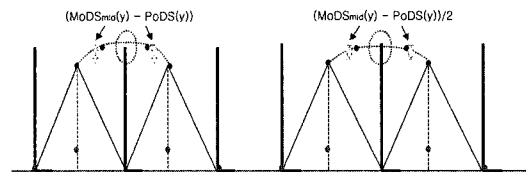
골반의 이동 움직임 궤적을 산출하기 위한 3차 큐빅 스플라인의 제어점은 $PoDS_{start}$ 와 $PoDS_{end}$ 의 위치인 HCP_0 , HCP_3 로 설정하고 나머지 두 제어점은 $PoDS$ 와 $MoDS_{mid}$ 사이로 HCP_1 , HCP_2 로 선정한다[그림 6].

큐빅 스플라인 곡선은 제어점들을 반드시 지나가므로 그림 7(a)와 같이 골반의 이동 궤적을 위한 제어점 HCP_1 과 HCP_2 의 높이를 다른 제어점으로부터 $MoDS_{mid}$ 와 $PoDS$ 차가 되는 지점을 선정하는 경우, 걷는 동작시 골반이 이동 궤적을 따라 $MoDS_{mid}$ 지점을 지나갈 때 다리길이와 같은 $MoDS_{mid}$ 의 높이를 초과하여 몸의 중심을 지탱하는 다리가 지면과 비접촉되는 부자연스러운 걷는 동작이 발생한다.

따라서 걷는 동작시 $MoDS_{mid}$ 지점에서 몸의 중심을

지탱하는 다리가 지면과 떨어지는 경우가 발생하지 않도록 그림 7(b)와 같이 두 제어점 HCP_1 과 HCP_2 의 높이는 다른 제어점으로부터 $MoDS_{mid}$ 와 $PoDS$ 차의 1/2이 되는 지점을 선정한다. 즉, 골반의 이동 궤적을 위한 제어점 선정은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 HCP_0(x_0, y_0, z_0) &= (PoDS_{start}(x), PoDS_{start}(y), PoDS_{start}(z)) \\
 HCP_1(x_1, y_1, z_1) &= (MID(PoDS_{start}(x), MoDS_{mid}(x)), \\
 &\quad \frac{PoDS_{start}(y) + MoDS_{mid}(y)}{2}, PoDS_{start}(z)) \\
 HCP_2(x_2, y_2, z_2) &= (MID(PoDS_{end}(x), MoDS_{mid}(x)), \\
 &\quad \frac{MoDS_{mid}(y) + PoDS_{end}(y)}{2}, PoDS_{end}(z)) \\
 HCP_3(x_3, y_3, z_3) &= (PoDS_{end}(x), PoDS_{end}(y), PoDS_{end}(z))
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



(a) $MoDS_{mid}(y) - PoDS(y)$ 인 경우 (b) $(MoDS_{mid}(y) - PoDS(y))/2$ 인 경우

그림 7 제어점 HCP_1 과 HCP_2 의 높이 선정

6.2 이동하는 다리의 움직임 궤적

이동하는 다리의 움직임 궤적을 위한 제어점은 그림 6과 같이 $MoDS_{start}$, $PoDS_{start}$, $PoDS_{end}$ 그리고 $MoDS_{end}$ 에 해당하는 위치들을 각각 SCP_0 , SCP_1 , SCP_2 , SCP_3 으로 선정한다. 여기서 제어점 SCP_1 과 SCP_2 의 높이는 다양한 지형에서 이동하는 다리가 움직일 때 $MoDS$ 발끝이 지형과 충돌하지 않기 위해 발의 전체길이(Foot Length+Toe Length)와 두 $MoDS$ 간의 높이차에 대한 합으로 한다.

따라서 이동하는 다리의 움직임 궤적의 제어점 선정은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 SCP_0(x_0, y_0, z_0) &= (MoDS_{start}(x), MoDS_{start}(y), MoDS_{start}(z)) \\
 SCP_1(x_1, y_1, z_1) &= (PoDS_{start}(x), totalFootLength \\
 &\quad + |MoDS_{mid}(y) - MoDS_{start}(y)|, MoDS_{start}(z)) \\
 SCP_2(x_2, y_2, z_2) &= (PoDS_{end}(x), totalFootLength \\
 &\quad + |MoDS_{end}(y) - MoDS_{mid}(y)|, MoDS_{end}(z)) \\
 SCP_3(x_3, y_3, z_3) &= (MoDS_{end}(x), MoDS_{end}(y), MoDS_{end}(z))
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

7. 다양한 지형과 충돌시 걷기 동작 계획

다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작을 위해 $MoDS$ 의 위치를 결정할 때 그림 8(a), 9(a)와 같이 $MoDS$ 의 발끝이나 발목이 지형과 충돌이 발생하는 경우 부자연스러운 동작이 된다. 따라서 지형과의 충돌을 예측하여 적절한 $MoDS$ 의 위치점을 선정한다.

그림 8(a)와 같이 오르는 지형에서 $MoDS$ 의 발끝이

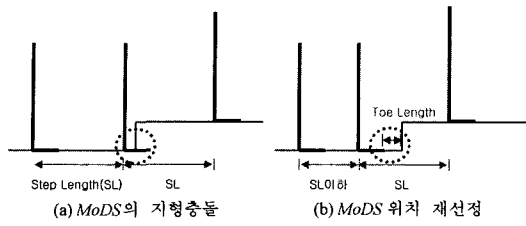


그림 8 MoDS 발끝의 지형 충돌시 위치 선정

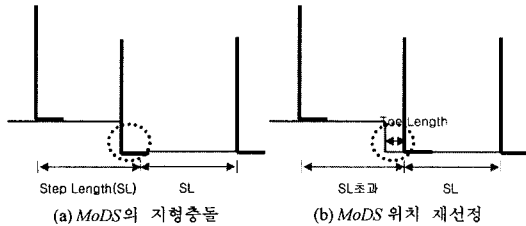


그림 9 MoDS 발목의 지형 충돌시 위치 선정

지형과 충돌하거나 그림 9(a)처럼 내려가는 지형에서 MoDS의 발목이 지형과 충돌하는 경우, 그림 8(b), 9(b)처럼 충돌 지형과의 거리를 발끝길이(Toe Length)만큼의 간격을 유지한다. 또한 지형과 충돌하지 않더라도 항상 MoDS의 발끝이나 발목은 그림 8(b), 9(b)와 같이 지형 경계면으로부터 발끝길이의 간격을 유지하도록 한다. 이는 이동하는 다리가 움직일 때 발끝이나 발목이 지형과 충돌하지 않고 자연스러운 동작을 생성하기 위해서이다.

8. 다양한 지형과 충돌시 골반과 이동하는 다리의 움직임 궤적 계획

다양한 지형에서 MoDS가 충돌하지 않더라도 5.2절에서 제안한 이동하는 다리의 궤적을 따라 움직이면 그림 10과 같이 이동하는 다리가 움직임 궤적을 따라 이동하면서 지형과 충돌하는 경우가 발생한다.

따라서 이동하는 다리가 이동 궤적을 따라 움직일 때 발끝이나 발목이 지형과 충돌하지 않으면서 자연스러운 동작을 얻기 위해서 이동 궤적을 위한 큐빅 스플라인의 제어점을 재설정한다.

우선, 그림 11과 같이 지형의 높이와 동일하게 수평거리로 지형충돌영역을 설정하여 MoDS_{start}와 MoDS_{end}의 발이 지형충돌영역에 포함하는지를 검사한다. 만약 지형충돌영역에 포함되는 경우 이를 충돌이 발생한 것으로 간주하여 그림 11과 그림 12처럼 이동하는 다리의 이동 궤적을 위한 제어점을 충돌이 발생한 MoDS의 위치로 재설정한다. 또한 다리 동작에 따른 골반의 자연스러운 움직임을 위해 수정된 이동하는 다리의 제어점과 동일

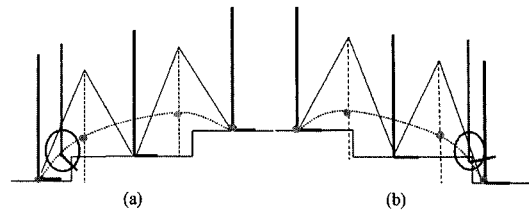


그림 10 이동하는 다리의 지형 충돌

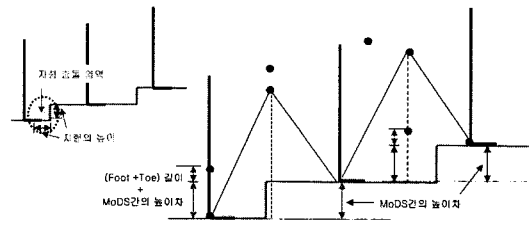


그림 11 MoDS_{start}의 지형 충돌시 제어점 설정

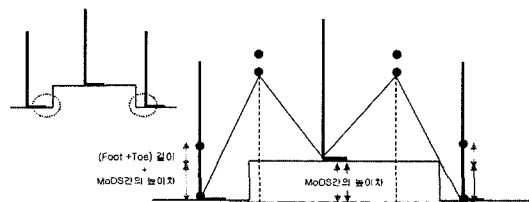


그림 12 MoDS_{start}와 MoDS_{end}의 지형 충돌시 제어점 설정

하게 골반의 제어점을 재수정한다[그림 11][그림 12].

9. 실험 및 분석

실험은 PentiumIII-700급 PC에서 Windows 2000의 운영체제, Microsoft Visual C++ 6.0 그리고 그래픽 라이브러리 OpenGL을 사용하여 행해졌다.

본 연구에서 제안된 다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작을 위한 MoDS의 위치, PoDS의 위치 그리고 골반과 이동하는 다리의 이동 궤적을 위한 제어점 등의 걷기 동작 계획을 그림 13에 도식화하였다.

그림 14는 4-6절에서 정의한 다리의 움직임을 통해 표현된 전신의 움직임 결과로 걸음폭은 0.34m/step, 걸음속도는 3km/h로 하여 왼쪽 다리의 걷는 동작을 보여주고 있다.

그림 15는 4-6절에서의 걷기 동작의 계획을 기반으로 다양한 지형에서 적응적인 걷는 동작을 생성하기 위해서, 7-8절에서의 지형 충돌을 고려하여 걷기 동작의 계획 방법에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림 15(a)는 지형의 충돌에 대해 전혀 고려하지 않는 경우로, 지

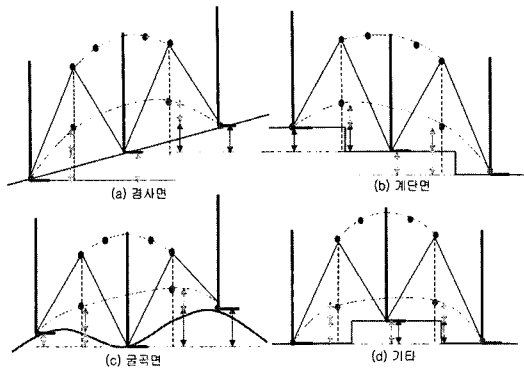


그림 13 다양한 지형에서의 걷기 동작 계획

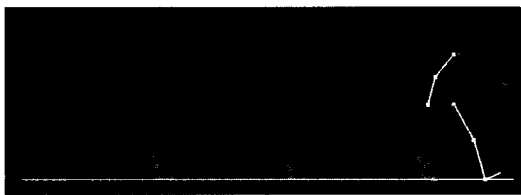


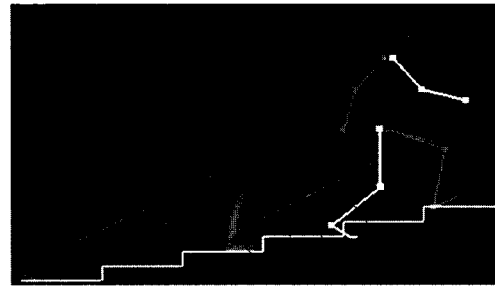
그림 14 평지면에서의 걷기 동작

면을 지탱하는 발과 이동 궤적을 따라 이동하는 다리의 발끝이 지형을 스며들거나 파고드는 등의 부자연스러운 동작이 생성된 결과이다. 그림 15(b)는 이동하는 다리의 이동 궤적만을 수정한 경우의 결과로, 이동하는 다리의 발끝은 지형과의 충돌없이 이동 궤적을 따라 자연스럽게 움직이지만, 지면을 지탱하는 다리의 발끝은 그림 15(a)와 같이 지형을 파고든다.

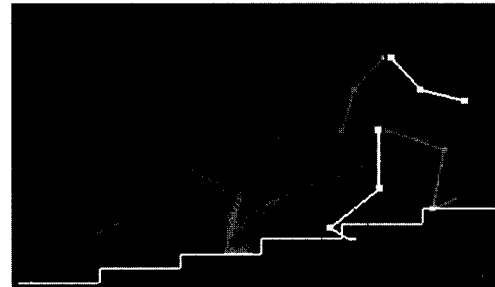
따라서 7-8절에서 제안하였듯이 다양한 지형에서의 적응적인 걷는 동작을 위해서는 지형과의 충돌을 반드시 고려해야만한다. 이러한 지형과의 충돌을 고려하여 걷기 동작 계획을 기반으로 그림 15(c)에서와 같이 자연스러운 걷기 동작을 생성하였다.

그림 16-18은 본 연구에서 제안한 방법으로 다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작의 생성에 대한 실험 결과이다. 즉, 평지면에서의 동작 움직임과 같이 걸음폭은 0.34m/step, 걸음속도는 3km/h로 하여 생성한 동작으로 그림 16은 평지면과 이루는 각도가 $\pm 10^\circ$ 인 경사 지형에서의 걷는 동작이고 그림 17는 계단 지형에서의 걷는 동작을 생성한 것이고 그림 18은 다양한 높이를 가진 지형에서의 걷는 동작을 생성한 결과들이다.

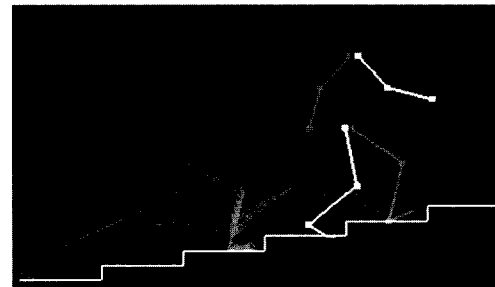
따라서 그림 16-18에서 생성된 동작 움직임을 보듯이 본 연구에서 제안된 방법으로 다양한 지형에 따라 지형과의 충돌을 인지하며 적응적인 동작을 취하면서 걷는 것을 볼 수 있다.



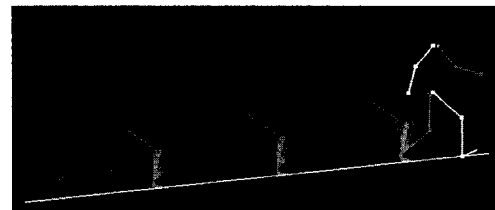
(a) 지형충돌과 이동궤적을 고려하지 않는 경우



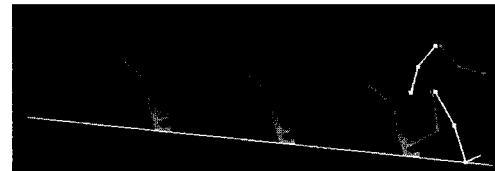
(b) 지형충돌을 고려하지 않고 이동궤적만 수정한 경우



(c) 지형충돌을 고려하고, 이동궤적을 수정한 경우
그림 15 지형 충돌에 대한 걷기 동작 계획

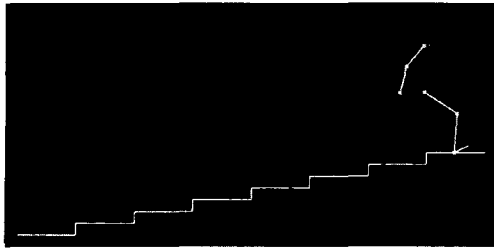


(a) 오르는 경사면 (지면과의 각도: $+10^\circ$)

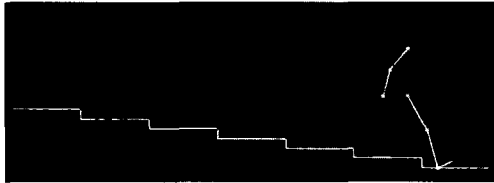


(b) 내려가는 경사면 (지면과의 각도: -10°)

그림 16 경사면에서의 걷기 동작



(a) 오르는 계단면



(b) 내려가는 계단면

그림 17 계단면에서의 걷기 동작

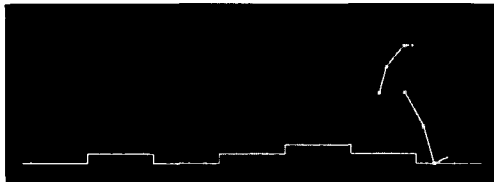


그림 18 기타 지형에서의 걷기 동작

10. 결론

본 연구에서는 걷는 동작을 생성하기 위해 사람의 전신 동작 계획을 바탕으로 적은 매개변수를 사용하였으며 또한 평지면, 경사면, 계단면 등의 다양한 지형에 따라 적응적인 걷기 동작을 생성하는 효율적인 방법을 제안하였다. 즉, 다양한 지형에 따른 적응적인 걷기 동작을 위한 계획으로 *MoDS*(Middle of Double Support)와 *PoDS*(Pelvis of Double Support)의 다리 동작 계획 방법과 3차 큐빅 스플라인 곡선으로 모든 지형에 적응적으로 관절의 이동 궤적을 산출할 수 있는 방법에 대해 제안하였다. 그리고 제안된 방법을 통해 평지면, 경사면, 계단면 등의 다양한 지형에서의 걷기 동작을 생성하여 지형에 따른 적응적인 걷는 동작을 확인하였다.

따라서 본 연구는 다양한 지형에서의 걷기 동작을 생성할 수 있는 다리 동작 계획을 통해 지형의 유형에 따라 관절들의 이동 궤적을 쉽고 효율적으로 제어할 수 있어 다양한 지형에 적응적인 걸음걸이를 생성할 수 있다는 장점이 있다. 또한 *MoDS*와 *PoDS*의 다리 동작 계획과 3차 큐빅 스플라인을 바탕으로 지형의 변화에 따른 다리 동작의 변화를 빠르게 계산할 수 있으므로 온라인 게임이나 가상현실내에서 캐릭터의 움직임을 표현

하는데 많은 기반이 될 것으로 본다.

앞으로 다양한 지형에 따라 달리기, 점프 등의 여러 유형의 동작에 대한 연구가 이루어져서 현실 세계의 움직임과 같은 효과를 제공함으로써 가상 현실 내에서의 사실감과 흥미도를 증가시킬 수 있도록 하여야 한다.

참고 문헌

- [1] "CG 애니메이션," 정보과학회지 제17권 제2호 통권 제117호 1999.02.
- [2] 송미영, 이금희, 엄기현, 김준태, 조형제, "걷기 움직임을 위한 전신의 기본 동작 계획", 2003 동계학술발표논문집, 한국게임학회, pages 243~248, 2003.
- [3] 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.
- [4] R. Boulic and D. Thalmann. "Combined direct and inverse kinematic control for articulated figures motion editing." Computer Graphics Forum, 11(4):189-202, 1992.
- [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] 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.
- [7] H. Ko and N. I. Badler. "Animating human locomotion in real-time using inverse dynamics." IEEE Computer Graphics & Applications, pages 50-59, 1996.
- [8] Chris Welman, "Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation," M.S. thesis, SIMON FRASER UNIVERSITY, 1993.
- [9] Harold C. Sun and Dimitris Metaxas, "Automating gait animation," Conference proceedings on Computer graphics, 2001.
- [10] A. Bruderlin and T. Calvert. "Goal-directed, Dynamic Animation of Human Walking." In Computer Graphics SIGGRAPH 89 Conference Proceedings, pages 233-242, 1989.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M.F.Cohen. "Interactive spacetime control for animation". In Processings of ACM SIGGRAPH,

pages 293-302. Addison Wesley, July 1992.

[14] J.Laszlo, M.van de Panne, and E. Fiume. "Limit cycle control and its application to the animation of balancing and walking." In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 155-162, New Orleans, Louisiana, August 1996. Addison Wesley.

[15] J.T.Ngo and J.Marks. "Spacetime constraints revisited." In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 343-350, Anaheim, California, August 1993. Addison Wesley.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Armin Bruderlin and Lance Williams. "Motion signal processing." In Computer Graphics SIGGRAPH 95 Proceedings, pages 97-104, 1995.

[19] M. Unuma, K. Anjyo, and R. Takeuchi. "Fourier principles for emotion-based human figure animation." In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 91-96, 1995.

[20] 이금희, 송미영, 조형제, "전신의 움직임을 표현한 캐릭터의 걷기 동작 생성", 2002 추계학술발표 논문집, 멀티미디어학회, pages 466-469, 2002.

[21] 송미영, 이금희, 엄기현, 김준태, 조형제, "지면의 성질에 따른 캐릭터의 걷기 동작 생성", 2003 동계학술발표 논문집, 한국게임학회, pages 255-262, 2003.

[22] 최지호, 백두원, 정문열, "경사면 위에서의 걷기 동작을 위한 리타겟팅 기법", 한국정보과학회, 2002.

[23] J.Lee and S.Y.Shin, "A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human-like Figures." Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH 1999), 39-48, 1999.

[24] 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.

[25] 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.



조 형 제

1973년 부산대학교 전자공학과 졸업(학사). 1975년 한국과학기술원 전기·전자공학과 대학원(공학석사). 1986년 한국과학기술원 전기·전자공학과 대학원(공학박사). 1986년~현재 동국대학교 컴퓨터·멀티미디어공학과 교수. 관심분야는 멀티미디어 정보처리, 영상처리, 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스, 2D/3D 게임



송 미 영

1995년 안양대학교 전자계산학과 졸업(학사). 1998년 동국대학교 컴퓨터공학과 대학원(공학석사). 1998년~현재 동국대학교 컴퓨터공학과 대학원(박사과정). 관심분야는 영상처리, 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스, 2D/3D 게임