

# 절차적 방법을 이용한 다관절체의 대화형 동작생성

(Interactive Animation of Articulated Bodies using a Procedural Method)

배희정<sup>†</sup> 백낙훈<sup>\*\*</sup> 이종원<sup>\*\*\*</sup> 유관우<sup>\*\*\*\*</sup>  
(Hee Jung Bae) (Nak Hoon Baek) (J. Won Lee) (Kwyan Woo Ryu)

**요약** 게임이나 가상 현실 등의 대화형 처리에서 다관절체의 동작을 실시간으로 처리할 필요성이 증가하고 있다. 최근에는 다관절체의 동작을 사실적으로 표현하기 위하여, 제약 동역학(constrained dynamics) 방법들이 사용되고 있으나, 이 방법들은 사용자의 요구가 빈번한 가상 공간에서 다관절체의 동작을 실시간으로 처리하기는 곤란하다. 본 논문에서는 다관절체의 동작을 비교적 사실적이면서도 빠르게 생성하기 위한 절차적 방법(procedural method)을 제안한다. 이 방법에는 다관절체를 구성하는 세그먼트들의 동역학적 움직임과 조인트에서의 기하학적 제약 조건을 따로 처리함으로써, 복잡한 선형 시스템의 풀이 과정을 피하였다. 결과적으로 본 논문이 제안하는 방법은 필요한 계산량을 줄임으로써 실시간 처리가 가능하다. 제안하는 방법의 구현 결과로서, 일반적인 PC 환경에서 인형 형태 다관절체의 동작을 대화형으로 실시간에 처리할 수 있음을 보인다. 이러한 방법들은 가상 공간에서의 캐릭터 애니메이션 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** In interactive environments including computer games and virtual reality applications, we have increased need for interactive control of articulated body motions. Recently, physically based methods including constrained dynamics techniques are introduced to this area, in order to produce more realistic animation sequences. However, they are hard to achieve real-time control of articulated bodies, due to their heavy computations. In this paper, we present a procedural method for interactive animation of articulated bodies. In our method, each object of the constrained body is first moved according to their physical properties and external forces, without considering any constraints. Then, the locations of objects are adjusted to satisfy given constraints. Through adapting this two-stage approach, we have avoided the solving of large linear systems of equations, to finally achieve the interactive animation of articulated bodies. We also present a few example sequences of animations, which are interactively generated on PC platforms. This method can be easily applied to character animations in virtual environments.

## 1. 서론

가상 현실이나 게임 제작 분야에서는 대화형으로 캐릭

터의 동작을 생성해야 하는 경우가 빈번하다. 특히, 가상 공간에서의 현실감을 위해서는 인체를 비롯한 캐릭터의 동작을 사용자의 의도에 일치하도록 생성하고, 대화형 요구를 만족시키도록 실시간으로 생성해야 한다. 대부분의 캐릭터들은 여러 개의 세그먼트(segment)들이 조인트(joint)로 연결되어 있고, 조인트에는 제약 조건(constraint)들이 주어지는 다관절체(articulated bodies)로 모델링될 수 있다. 이러한 다관절체의 동작을 사실적으로 생성하기 위해서는 세그먼트의 움직임을 조인트에 주어진 제약 조건에 맞추어 생성해야 한다. 반면에, 사용자의 즉흥적이고 돌발적인 요구가 빈번한 가상 환경에서

<sup>†</sup> 학생회원 : 경북대학교 컴퓨터공학과  
hjbae@dreamwiz.com

<sup>\*\*</sup> 정회원 : 동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과 교수  
nhbaek@dgu.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 정회원 : (주) KOG 대표  
wonlee@kogsoft.com

<sup>\*\*\*\*</sup> 통신회원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수  
kwryu@bh.knu.ac.kr

논문접수 : 2001년 1월 31일

신사완료 : 2001년 9월 19일

는 이러한 다관절체의 움직임을 실시간에 사실적으로 생성하기가 쉽지 않다. 현재까지 다관절체의 애니메이션을 위한 다양한 기법들이 제시되었으나[1-4], 이들을 대화형 시스템에 직접 적용하기에는 곤란한 경우가 많다.

일반적으로 다관절체의 동작을 생성하기 위해서는 운동학(kinematics)에 의한 방법들과 물리 기반의 동역학(dynamics)에 의한 방법들이 사용되고 있다[1,5]. 운동학에 의한 방법에서는 생성하고자 하는 주요 동작에 관한 데이터들을 이용하여 실제와 유사한 동작을 비교적 쉽게 만들 수 있으나, 주어진 동작 데이터를 사용자의 요구에 맞도록 재생성하는 과정을 필요로 한다. 이러한 재생성 과정은 사용자의 요구가 있을 때마다 처리되어야 하므로, 사용자의 제어가 빈번한 경우에는 실시간으로 동작을 생성하기가 어려워진다.

물리 기반의 동역학적 방법에서는 동작을 생성하고자 하는 다관절체에 대하여 질량과 관성 텐서(inertia tensor) 등의 물리적인 성질들을 이용하여, 이들의 움직임을 물리 법칙에 맞도록 생성한다. 사용자의 제어에 따라 변화되는 움직임은 물리 기반으로 사실적이고 정확하게 생성될 수 있다. 그러나, 다관절체의 동작 특성인 제약이 주어진 동역학적 움직임을 생성하기 위해서는 복잡한 선형 시스템의 풀이 과정을 필요로 한다는 단점이 있다. 또한, 생성되는 동작이 힘이나 가속도 등의 물리 속성에 의해서 제어되는 경우가 많으므로, 위치 등의 기하학적 정보를 이용하여 제어하는 대화형 처리에서는 이 방법을 적용하기가 까다롭다.

최근에는 관절체를 비롯한 실세계 물체의 애니메이션을 PC와 같은 제한된 계산 능력을 가지는 시스템에서 생성하기 위하여 절차적 방법(procedural approach)들이 연구되고 있다[5,6]. 절차적 방법에서는 산이나 바다 등을 비롯한 자연 현상들을 비교적 단순한 수식으로 모델링한 후, 이를 이용하여 실제와 유사한 장면들을 생성할 수 있다[7-9]. 이러한 개념은 대화형 처리가 요구되는 가상 공간에서의 실시간 동작 생성을 위한 현실적인 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다[5]. 본 논문에서는 다관절체의 동작을 비교적 사실적이고 실시간으로 생성할 수 있는 절차적 동작 생성 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 절차적 방법에서는 제약이 주어진 동역학적 움직임을 실시간으로 생성하기 위해서, 선형 시스템의 풀이 과정을 피할 수 있도록 단계적으로 동작을 처리하고자 한다. 단계적 처리에서는 우선 세그먼트들의 움직임을 조인트의 제약 조건 없이 동역학적으로 계산한 후, 이렇게 계산된 세그먼트들의 기하학적 관계를 이용하여 조인트에 주어진 제약 조건들을 만족

시킨다. 이 방법에서는 조인트에 주어진 제약을 가속도나 힘과 같은 물리 속성으로 해석하는 것이 아니라, 위치나 방향과 같은 기하학적 제약으로 해석함으로써 계산량을 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은 일반적인 PC 환경에서 대화형 처리를 통하여 캐릭터의 동작을 생성하는 데에 목적을 둔다. 이를 위하여, 동역학에 기초한, 단순화된 다관절체 모델을 사용한다. 또한, 조인트로 연결된 세그먼트들간의 힘의 전달 과정은 다관절체의 위상 정보를 이용하여 빠른 시간에 해석할 수 있도록 한다. 생성되는 동작에 현실감을 더하기 위해서는 생성된 동작에 특정한 동작을 추가할 수도 있다. 본 논문에서는 추가되는 동작의 한 예로서, 가해지는 움직임에 반발하는 동작을 추가한 구현 예를 보인다. 이 방법은 사용자의 제어에 따라 다양한 움직임을 생성하는 데에 사용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 동작 생성을 위한 여러 가지 기법들에 관한 연구 결과를 살펴본다. 3장에서는 이 논문에서 제안하는 접근 방법에 대하여 설명한다. 4장에서는 절차적 방법에 대해 기술하고, 제약이 주어진 세그먼트들의 움직임을 기하학적 관계와 물리적 성질을 고려하여 생성하는 방법을 제안한다. 5장에서는 본 논문에서 제시된 제약 해결 방법을 기본으로 다양한 제약이 부여된 계층 구조를 이루는 다관절체에 적용하는 방법을 설명한다. 6장에서는 이 방법을 응용하여 사용자의 제어에 따른 캐릭터의 애니메이션 예제를 보인다. 마지막으로, 7장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

## 2. 관련 연구

다관절체의 동작 생성을 위한 일반적인 방법으로는 운동학(kinematics)에 의한 방법[2]과 동역학(dynamics)에 의한 방법들[1,3]이 있다. 운동학 방법은 다관절체의 애니메이션을 위하여 시간에 따른 각 세그먼트의 위치를 계산하거나, 역 운동학(inverse-kinematics)에 의해 세그먼트 각각의 조인트각을 구함으로써 연속되는 움직임을 생성한다. 이 방법에서는 사용자의 요구에 맞는 세그먼트의 정확한 위치를 구하기 위한 시공간 제약(spacetime constraint) 기법[4] 등을 이용하는 연구들이 진행되고 있다[4,10]. 최근에는 동작의 초기 데이터를 다관절체의 다양한 모델에 적용시키기 위하여 동작의 초기 데이터를 편집(editing)하거나 수정 보완(adjusting)하는 연구들도 활발히 진행되고 있다[11,12]. 이 방법들은 대부분 새로운 동작을 생성하기 위한 최적화 과정을 필요로 하므로, 사용자의 요구가 빈번한 처리에서는 실

시간으로 처리하기가 어렵다. 더욱이, 동작의 생성시 근본적으로 필요한 다관절체에 내외부적으로 작용하는 힘을 고려하지 않으므로, 사용자의 돌발적이고 다양한 제어에 따른 적절한 동작을 생성하기에는 한계가 있다.

동역학적 방법은 다관절체를 물리 기반으로 모델링하고, 이들을 동역학 법칙에 의해 움직이도록 하여 시간에 따른 각 세그먼트의 위치 데이터를 생성한다. 이 방법에서는 사용자가 가하는 외부 힘에 따른 세그먼트의 위치를 계산하기 위하여 수치 적분 방법 등을 이용하는데, 안정적이고 수치 오차가 작은 해를 구하기 위해서는 적절한 적분법을 필요로 한다[1]. 또한, 이 방법은 제약이 주어진 세그먼트의 움직임을 동역학적으로 해결하기 위하여 복잡한 선형 시스템의 풀이를 필요로 하므로, 이러한 선형 시스템의 효율적 처리에 관한 연구들이 진행되고 있다. Armstrong 과 Green 등은 재귀적 방법으로 선형 시간에 선형 시스템을 푸는 방법을 제시하였는데[13], 복잡한 다관절체의 경우에는 이들의 선형 시스템을 실시간에 구성하는 것이 까다로워 대화형 처리에 이를 적용하기가 쉽지 않다.

Isaacs와 Cohen은 역 동역학(inverse dynamics) 방법을 이용하여 사용자가 설정한 힘에 대응되는 가속도를 계산해 내는 방법을 제시하였는데[14], 이 방법은 동역학에 의한 해법보다 더 복잡한 계산을 필요로 하는 경우가 많다. Westenhofer와 Hahn은 운동학과 제약이 주어진 동역학이 결합된 제어 기술을 제안하여 제어가 간단한 동작 시스템을 제시하였다. 최근에는 제약이 주어진 동역학에 기반한 방법의 필수 요소인 선형 시스템을 선형 시간에 해결하기 위한 연구들이 진행되고 있으나, 아직까지는 이러한 방법들을 상호 작용이 빈번한 가상 현실이나 게임 분야에서 실시간으로 적용하기가 쉽지 않다.

1980년대에는 물리적인 현상과 자연 현상을 표현하기 위한 연구들이 활발히 진행되었는데, 여러 연구자들은 각 현상들을 그럴듯하게 만들어 내는 절차적인 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 각 현상을 물리 법칙에 기초하여 정확하게 계산해 내는 것이 아니라, 간단한 수식을 이용하여 그럴듯하게 흉내 내는 기법을 사용한다. Reeves와 Peachey는 움직이는 바다물 생성하는 방법을 제안하였는데[8][15], 유체 역학에 의한 계산 방법이 아니라, 삼각(trigonometric) 함수들을 조합하여 생성하는 방법을 제시하였다. 또한, Weil은 주름진 천과 걸려져 있는 천의 복잡한 모양을 연구하였는데[16], 캐터너리(catenary) 함수를 이용하여 생성하는 방법을 제시하였다.

최근에는 동작 생성의 실시간 처리를 위하여 절차적

방법을 사용하는 연구들이 진행되고 있다. Milenkovic은 공간의 제약이 주어진 물체의 동작을 생성하는 데에 절차적 방법을 제시하였다[17]. 이 방법은 물체의 움직임을 해당 물체의 위치에 기반하여 생성함으로써, 주어진 공간 내에 설정된 제약 조건들을 해결한다.

Gascuel은 다관절체의 제약 조건을 해결하기 위한 문제를 연구하였는데[18], 본 논문의 단계적인 절차 방법과 문제의 접근 방식이 비슷하다. 이들은 변위에 대한 제약을 이용하는 방법을 제시하였는데, 본 방법과는 달리 반복적인 수행 처리와 속도에 대한 추가 처리를 필요로 한다.

Barzel은 로프나 스프링의 움직임을 빨리 생성하기 위한 방법을 제시하였는데, 이 방법에서는 로프와 스프링은 관절체들이 연결된 형태로 모델링한 뒤, 그 동작 특성에 해당되는 간단한 함수를 제시하여 제어에 따른 움직임을 그럴듯하게 생성하도록 하였다[2]. 이 방법들은 실제 동작과 유사한 동작을 빠르게 생성하므로, 실시간 처리가 중요한 상호 작용 시스템에서 사용할 수 있는 실용적인 대안이 될 수 있을 것이다.

### 3. 기본 아이디어

다관절체는  $n$ 개의 세그먼트들이 서로 연결된 형태로 모델링 할 수 있으며, 각 세그먼트들을 연결하고 있는 조인트에서는 각 세그먼트의 자유도에 대응되는 운동학적 제약 조건들이 부여될 수 있다. 강체(rigid body)로 근사된 각 세그먼트는 질량(mass)과 관성 텐서(inertia tensor) 등의 물리량, 위치와 방향 등의 기하 정보, 그리고 각 조인트에 대한 정보 등을 가진다. 조인트에 대한 정보는 자유도의 제약이나 관절각의 유효 범위와 같은, 운동학적 제약 조건을 포함한다.

세그먼트의 동작 생성을 위해서는 매 프레임(frame)마다 각 세그먼트의 위치와 방향을 결정해야 한다. 다관절체의 경우에는, 조인트에 주어진 제약 조건을 만족하도록 각 세그먼트의 위치와 방향을 결정하는 것을 의미한다. 이러한 제약이 주어진 다관절체의 움직임을 사실적으로 정확하게 해석하기 위한 동역학 방법들이 연구되고 있는데, 이들은 세그먼트들의 위치와 방향을 동역학 법칙에 따라 계산하고, 계산된 위치와 방향이 조인트들에 주어진 운동학적 제약 조건들을 만족시키도록 하는 일련의 과정을 거친다. 이 때, 세그먼트의 새로운 위치와 방향은 다음 세 조건식들[1]을 동시에 만족시키는 해를 구함으로써 얻어진다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\lambda} \quad (2)$$

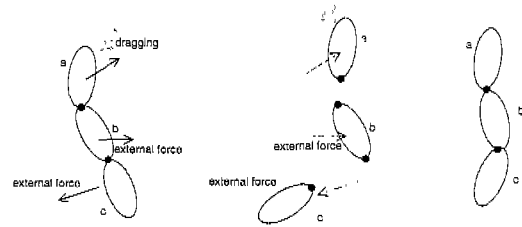
$$g(t, \mathbf{x}) = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{x}$ 는 세그먼트의 위치 벡터(position vector)이고,  $\mathbf{D}$ 는 조인트에 연결된 세그먼트의 위치 벡터의 행렬이며,  $\mathbf{v}$ 는 세그먼트의 속도 벡터를 나타낸다.  $\mathbf{M}$ 은 세그먼트들의 일반화된 질량 행렬(generalized mass matrix)이고,  $\mathbf{f}$ 는 외부에서 가해지는 힘을 표현한다. 그리고  $\mathbf{J}$ 는 모든 제약에 관한 함수들(constraint functions)을 합성한  $\mathbf{g}(t, \mathbf{x})$ 에 대한 자코비언 행렬(Jacobian matrix)  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x}$ 이다.

제약 조건을 만족하는 세그먼트의 위치  $\mathbf{x}$ 는, 조인트에 연결된 세그먼트의 위치에 관한 함수인 식 (3)과, 동역학 법칙에 의한 세그먼트의 위치에 관한 식 (2)에 의해 계산된다. 식 (3)을 2차 미분하여 식 (2)에 대입함으로써, 각 조인트에서의 제약 조건을 유지시키도록 하는 힘 (constraint force)  $\lambda$ 의 값을 구할 수 있고, 계산된  $\lambda$ 를 식 (2)에 대입하여 형성되는 선형 방정식을 풀이하거나, 재귀적인(recursive) 방식으로 위의 조건들을 만족하는 가속도를 구한다. 마지막으로, 제약을 만족하는 위치는 계산된 가속도를 수치 적분함으로써 계산할 수 있다. 이때, 제약 조건을 만족하는 가속도를 구하더라도, 수치 적분 과정에서의 오차로 인하여 조인트에서의 제약 조건이 만족되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 동역학 방법들에서는 Baumgarte stabilization 방법[19]을 사용하기도 하나, 이 방법은 제약 조건을 유지하기 위하여 매 프레임마다 적절한 댐핑(damping) 값을 적용시켜야 하고, 댐핑 값의 수치와 시간 간격이 증가하면 선형 시스템의 해가 불안정해지는 문제점이 있다[20].

본 논문에서 제안하는 방법은 조인트에서의 제약 조건을 다른 방식으로 만족시킴으로써, 선형 시스템의 풀이 과정이나, 수치 적분으로 인한 불안정성을 피하고자 한다. 기본 아이디어는 그림 1에서와 같이, 제약 조건을 두 단계로 분리하여 만족시키는 것이다. 즉, 물체의 동역학에 의한 움직임에 관한 부분과 제약 조건을 해결하는 부분을 차례로 처리한다.

먼저 update 단계에서는 그림 1.(b)에서와 같이, 다관절체를 구성하는 각 세그먼트의 위치와 방향을 동역학 법칙에 따라 갱신한다. 이 때, 조인트에 주어진 제약 조건은 고려하지 않기 때문에, 각 세그먼트들은 제각기 흩어질 수 있다. 새로 갱신된 각 세그먼트들의 위치와 속도는 각각  $\mathbf{x}(t+\Delta t)^{update}$ 와  $\mathbf{v}(t+\Delta t)^{update}$ 로 표시할 수 있다. 다음으로, adjust 단계에서는 그림 1.(c)에서와 같이, 조인트에서의 제약 조건을 만족하도록 update 단



(a) 초기상태 (b) update 단계 (c) adjust 단계  
그림 1 절차적 방법

계에서 갱신된 각 세그먼트의 위치와 방향을 보정한다.  $\delta \mathbf{x}$ 와  $\delta \mathbf{v}$ 를 각각 update 단계에서 갱신된 위치와 속도의 오차값이라 하면, 제약 조건을 만족시키도록 수정된 최종 위치  $\mathbf{x}(t+\Delta t)$ 와 속도  $\mathbf{v}(t+\Delta t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+\Delta t) &= \mathbf{x}(t+\Delta t)^{update} - \delta \mathbf{x} \\ \mathbf{v}(t+\Delta t) &= \mathbf{v}(t+\Delta t)^{update} - \delta \mathbf{v} \end{aligned}$$

여기서,  $\delta \mathbf{x}$ 와  $\delta \mathbf{v}$ 는 각각 위치와 속도의 오차값이다. 기존의 동역학 방법들에서는 이들 값들을 수치 적분 등의 방법으로 계산하였으나, 본 논문에서는 세그먼트들 간의 기하학적 관계로 이 값들을 해석하여, 최종적으로 수정에 적용될 위치의 이동과 회전 값들을 바로 구할 수 있는 방법을 제시한다. 이 방법은 기하학적 상태에 물리적 성질을 적용하여 풀이함으로써, 실제와 유사한 동작이 생성되도록 하는 세그먼트의 위치와 방향을 빠르게 안정적으로 근사시키는 데에 목적을 둔다.

본 논문이 제시하는 방법은 제약 동역학(constrained dynamics) 방법에 비하여 물리적으로는 정확도가 떨어지지만, 시간적으로는 실제와 유사한 동작을 생성할 수 있다. 이 방법은 다음과 같은 장점들을 가진다. 첫째로, 제약 동역학(constrained dynamics) 방법에 비해 처리 속도가 빠르다. 제시하는 방법은 update 과정 후 나타난 세그먼트의 위치와 방향을 이용하여 조인트에서의 제약 조건을 기하학적인 해법으로 해결하므로, 기존의 가속도 기반 해법에 비해, 보다 빠른 처리가 가능하다. 둘째로, 기존의 방법에 비해 대화형 시스템에 적용하기가 용이하다. 대화형 시스템에서는 사용자가 마우스나 트랙커와 같은 인터페이스를 이용하여 각 세그먼트의 위치와 방향을 직접 제어하는 경우가 많으므로, 힘이나 가속도에 기반한 다른 방법들에 비해, 사용자의 제어가 쉬워진다.

#### 4. 절차적 방법을 이용한 제약 조건의 해결

절차적 방법은 동작 현상을 일정한 규칙으로 모델링하고, 이를 이용하여 실제와 유사한 동작을 빠르게 생성하는 데에 목적을 둔다. 본 장에서는 본 논문에서 제안하는 절차적 방법의 단계적 처리를 구체적으로 설명하고, 조인트에서의 제약 조건을 해결하기 위한 방법을 제안한다. 조인트에 주어진 제약을 빠르게 해결하는 문제는, 다관절체의 움직임을 현실감있고 자연스럽게 생성하기 위한 필수적인 요소이다. 본 논문에서는 이를 위하여, 세그먼트의 동역학적 움직임을 생성하는 update 단계와 조인트의 제약을 해결하는 adjust 단계로 나누어 단계적으로 처리하여, 해당 조인트에서의 제약을 빠르게 해결한다. 설명의 편의를 위하여, 이 장에서는 두 개의 세그먼트가 하나의 조인트로 연결된, 단순한 형태의 다관절체를 처리하는 방법을 보이고, 다음 장에서는 이 방법을 일반적인 다관절체로 확장하는 방법을 보일 것이다.

#### 4.1 위치 및 방향의 갱신

본 논문이 제안하는 방법의 update 단계에서, 각 세그먼트는 3장에서 설명한 바와 같이 외부 힘에 의해 위치와 방향을 갱신한다. 세그먼트들에 작용할 수 있는 외부 힘으로는 사용자의 입력, 중력, 공기 저항, 그리고 충돌에 의한 반발력 등이 있다. 본 논문에서는, 3장에서 설명한 바와 같이, 수치 적분에 의한 오류를 피하기 위해, 이전 단계에서의 거리의 변화량으로 속도를 근사시키는 Stoermer's 적분 기법[21]을 이용한다. 이 기법에서는  $t+\Delta t$  시간에서의 위치  $\mathbf{x}_i(t+\Delta t)^{update}$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{x}_i(t+\Delta t)^{update} = \mathbf{x}_i(t) + \Delta \mathbf{x}_i(t+\Delta t)$$

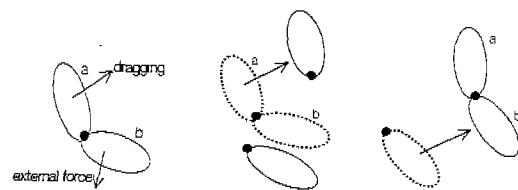
$$\Delta \mathbf{x}_i(t+\Delta t) = k \cdot \Delta \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{a}_i(t) \cdot \Delta t^2$$

이 적분 기법에서  $\Delta \mathbf{x}_i(t)$ 의 초기값은  $\Delta \mathbf{x}_i(0) = \mathbf{v}_i(0) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{a}_i(0) \cdot \Delta t^2$ 의 관계식을 포함한다. 즉, 위치 증가값  $\Delta \mathbf{x}_i(t+\Delta t)$ 는 현재 속도론 거리 변화량으로 근사시키고, 가속도는 현재 적용되는 힘의 방향에 비례하는 값으로 가정하여 계산한다.  $k$  ( $0 \leq k \leq 1$ )는 공기 저항이나 수압과 같은 외부 환경에 의한, 속도 변화의 차이를 반영하기 위한 댐핑 상수이다. 또한, 이것은 조인트에서 발생하는 마찰력과 같은 외부 조건을 반영할 수 있다. 위와 같이 계산된 근사값은 다음 절에서 설명하는 바와 같이, 조인트에 주어진 제약 조건들을 만족시키도록 보정하는 adjust 단계를 거친다.

#### 4.2 조인트에서의 제약 해결

update 단계에서는 각 세그먼트를 독립적으로 갱신하므로, 각 세그먼트들은 서로 분리되어 있을 수 있다. 제안하는 방법의 adjust 단계에서는 update 과정을 거친

세그먼트들의 기하학적 위치 관계를 이용하여, 각 세그먼트의 위치를 조인트에서의 제약 조건을 만족시키도록 보정한다. 설명의 편의를 위해, 본 절에서는 가장 간단한 다관절체인, 두 개의 세그먼트가 하나의 점대점(point to point) 조인트로 연결된 경우를 다룬다. 다관절체의 초기 상태에 대하여 사용자가 제어를 하였을 때, 발생하는 움직임의 갱신과 제약의 해결에 대한 개략도는 그림 2에서와 같다.



(a) 초기 상태 (b) update 단계 (c) adjust 단계

그림 2 동작 갱신

그림 2.(a)와 같은 초기 상태를 가지는 세그먼트들은 update 단계 후, 그림 2.(b)에서와 같이 위치  $\mathbf{x}(t+\Delta t)^{update}$ 로 이동되는데, 조인트에서의 제약을 만족시키지 못하는 위치와 방향의 오차값  $\delta \mathbf{x}$ ,  $\delta \omega$ 를 포함하게 된다. 따라서, 이 오차값  $\delta \mathbf{x}$ 와  $\delta \omega$ 는 그림 2.(c)에서와 같이 제약이 만족되는  $\mathbf{x}(t+\Delta t)$ 를 생성하도록 수정되어야 하는데, 본 방법에서는 오차값들에 해당되는 강제적인 평행 이동과 강제 회전을 구함으로써 이 값들을 근사한다. 이제부터는 해당하는 강제적인 이동과 회전의 최소한의 값을 구하기 위한 처리 과정을 조인트에 연결된 세그먼트가 고정된 위치를 가지는 경우와 자유롭게 이동할 수 있는 경우로 나누어 차례로 설명하겠다.

##### 4.2.1 고정 위치에서의 제약 해결

각 조인트들의 조건을 만족시키기 위한 강제적인 평행 이동과 회전은 본 절에서 제시하는 기하학적인 관계로 해석되며, 그림 3에서와 같이 하나의 세그먼트가 고정된 경우에 대해 먼저 설명한다. 그림 3에서와 같이, 세그먼트 a와 b가 조인트 c에 의해 연결되어 있고, 세그먼트 a의 위치는 고정되어 있다고 가정하자.

update 단계를 수행한 후에는 세그먼트 a와 b가 서로 분리되어 있을 수 있고, 이 때, 각 세그먼트 상에서의 조인트 c의 위치를 각각  $c_a$ ,  $c_b$ 라 하자. 세그먼트 a는 고정되어 있다고 가정했으므로, 세그먼트 b에 강제 이동 및 강제 회전을 적용시켜  $c_a$ 와  $c_b$ 의 좌표가 일치하도록 함으로써, 조인트 c에 의한 제약 조건을 만족시킬

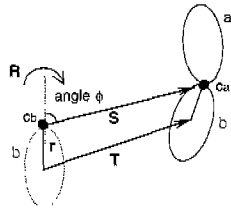


그림 3 기하학적 제약 조건

수 있다. update 단계 이후의 세그먼트 b의 중심점 위치를  $x^{update}$ 라 하면,  $x^{update}$ 에서  $c_b$ 까지의 벡터는  $r = c_b - x^{update}$ 로 표현할 수 있다. 또,  $c_a$ 와  $c_b$ 간의 거리는  $s = c_a - c_b$ 로 계산된다. 물체 a와 b가 접대점 조인트로 연결되어 있다고 가정한다면, 상대 거리  $s_{ab}$ 는 이동에 대한 제약을 위배한 오차값이 되며, 이 값은 결국 위치 오차  $\delta x$ 와 이로 인한 회전 오차값  $\delta \omega$ 를 합한 값이 된다. 따라서,  $c_a$ 와  $c_b$ 의 기하학적 관계로부터 오차를 수정하게 될 강제 이동과 강제 회전의 결과는 다음의 관계식을 만족시켜야 한다.

$$r + s = R_{ab} \cdot r + T_{ab}$$

여기서,  $R_{ab}$ 와  $T_{ab}$ 는 각각 세그먼트 b에 적용되어야 할 강제 회전 행렬과 강제 이동 벡터를 나타내고,  $\delta \omega$ 와  $\delta x$ 를 각각 수정하기 위하여 적용된다.

강제 이동과 강제 회전은 update 단계에서 물리 법칙을 이용하여 계산된 각 세그먼트의 위치에 최소한의 변화만을 가져오는 것이 자연스럽다. 우선, 강제 회전 행렬은  $s$ 와  $r$ 로부터 회전축  $A$ 와 회전각  $\theta$ 를 계산할 수 있다. 회전각을 최소화하기 위해, 회전축은  $A = \frac{r \times s}{|r \times s|}$ 로 설정하고, 회전각  $\theta$ 는 세그먼트 b의 각운동량을 최소화함으로써 구할 수 있다. 강제 이동을 유발시키는 가상의 힘  $f$ 는  $f = m_b \cdot a = \frac{2m_b}{(\Delta t)^2} \cdot s$ 로 근사시킬 수 있고, 이 때, 각운동량  $r$ 는  $r = r \times f$ 로 계산된다. 세그먼트 b의 관성 모멘트(moment of inertia), 각 가속도를 각각  $I_b$ ,  $\alpha$ 라 하면,  $r$ 의 크기는  $I_b \cdot \alpha$ 로 계산되어야 하고, 최종적으로 각가속도  $\alpha$ 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\alpha = \frac{2m_b}{I_b \cdot (\Delta t)^2} \cdot |r| \cdot |s| \cdot \sin \phi$$

여기서,  $\phi$ 는  $r$ 과  $s$ 가 이루는 각도이다. 강제 회전에서 사용되는 회전각  $\theta$ 는 이제 각 가속도  $\alpha$ 로부터 설정되는데,  $\theta$ 의 범위는 0에서  $\phi$ 사이이고, 그 변화는 다

음의 조정 함수를 사용한다.

$$\theta = \phi \cdot e^{\frac{-h}{|r| \cdot |s|}} \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는  $\frac{2m_b}{I_b \cdot (\Delta t)^2}$ 이다. 식 (4)는 회전량을 부드럽게 변화시키며, 급격한 변화를 막아주는 역할을 한다. 회전각  $\theta$ 는  $r$ ,  $s$ 의 크기가 증가함에 따라  $\phi$ 에 가까워지게 되며,  $r$ ,  $s$ 가 아주 작은 값일 경우에는 0에 가까워진다. 또한, 세그먼트의 물리적인 속성을 나타내는  $h$ 의 변화에 따라 회전의 변화 폭을 조정할 수 있다. 따라서, 강제 회전  $R_{ab}$ 는 기준축과 조정된 각  $\theta$ 로부터 계산할 수 있다.

이제, 구해진 강제 회전  $R_{ab}$ 의 값을 이용하면, 이동하여야 하는 강제 이동  $T_{ab}$ 의 값은 다음 수식에서와 같이 계산할 수 있다

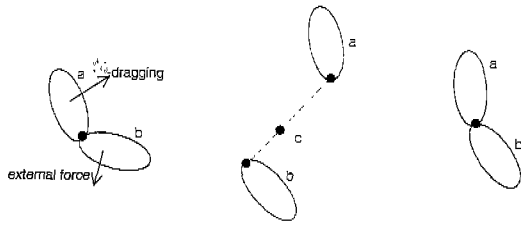
$$T_{ab} = (I - R_{ab}) \cdot r + s$$

여기서,  $I$ 는  $3 \times 3$  단위 행렬을 나타낸다. 최종적으로는 구해진 강제 이동과 강제 회전의 값으로 제약 조건을 만족시키도록 세그먼트 b의 위치와 방향을 보정할 수 있다.

#### 4.2.2 이동 물체에서의 제약 해결

앞 절에서는 제약을 해결하기 위한 강제 이동과 회전을 구하는 기본적인 방법을 설명하였다. 본 절에서는 4.2.1절에서와는 달리 두 개의 세그먼트 모두가 자유롭게 이동하는 경우에 대하여 다룬다. 이 경우 update 과정을 거친 두 세그먼트 모두는 제약 조건을 만족하지 않는 위치와 방향으로 이동하게 된다. 본 방법에서는 이들의 해당 조인트에 주어진 제약을 유지시키기 위하여, 조인트에 주어진 기하학적 관계를 만족시키도록 하는 조인트 점(joint point)의 위치를 찾는다. 이 문제는 제약을 빠르게 해결하기 위한 중요한 요소가 되나, 정확한 위치를 계산하기는 어렵다. 이를 위하여 본 방법에서는 세그먼트들의 물리적 속성과 기하학적 관계를 이용하여 이 위치를 근사한다. 그림 4는 이동 물체에서의 제약을 해결하기 위한 절차를 나타내는데, 우선 조인트의 위치를 근사적으로 계산한 후, 이 위치를 기준으로 앞 절에서의 방법으로 각 세그먼트에 대하여 각각 강제 회전과 이동 값을 구한다.

그림 4.(a)와 같이 초기 상태를 가지는 세그먼트 a와 b는 update 단계 후, 조인트 c의 위치가 분리되어 각각의 조인트  $c_a$ ,  $c_b$ 를 가지게 된다. 이 때, 세그먼트들 간의 연결 상태를 유지하기 위한 조인트 점  $c$ 는 다관



(a) 초기 상태 (b) 조인트점 계산 (c) 최종 상태

그림 4 이동 물체에서의 제약 해결

절체의 움직임을 최대한 자연스럽게 표현하여야 한다. 따라서, 본 방법에서는 일반화된 제약 조건을 해결하기 위한 힘(constraint force)의 성질과 세그먼트의 물리적 특성을 이용하여 그 점을 구한다. 먼저, 그림 4.(b)에서와 같이 새로운 점  $c$ 는 두 조인트들의 연결선 상에 있는 임의의 한 점으로 가정하고, 이 점을 유지하기 위하여 작용하는 힘(constraint force)은 방향은 반대이고 크기는 동일하다는 일반적인 성질을 이용한다. 다음으로 고려되는 사항은, 연결선 상에서 각 세그먼트의 선형 이동은 세그먼트의 질량과 관성 텐서의 물리적인 속성에 반비례한다는 성질을 이용한다. 따라서, 구하는 점에 대하여 세그먼트  $a$ 와  $b$ 의 질량을  $m_a$ 와  $m_b$ 라 한다면, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$m_a \cdot (c_a - c) = m_b \cdot (c - c_b)$$

이제 조인트 점  $c$ 는  $c_a$ ,  $c_b$  상의 한 점에 위치하게 되며 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$c = \frac{m_a \cdot c_a + m_b \cdot c_b}{m_a + m_b}$$

최종적으로 강제 이동과 회전량은 계산된 조인트 점을 기준으로, 앞 장에서 기술한 고정 위치에서의 조인트 해결 방법을 이용하여 구해진다. 이 값은 조인트에서의 제약을 만족하도록 각 세그먼트의 위치와 방향값을 보정하는데 사용된다.

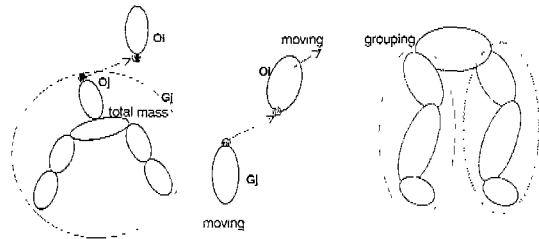
## 5. 다양한 다관절체에 대한 확장

이제까지는 두 개의 세그먼트들이 연결되어 있는 다관절체의 간단한 경우에 대하여 다루었다. 실세계에 존재하는 대부분의 물체들은 여러 개의 세그먼트들이 다양한 제약이 주어진 조인트들로 연결된 다관절체로 모델링할 수 있다. 본 장에서는 이러한 다관절체에서의 제약 조건을 해결하기 위하여, 계층 구조로 연결된 다관절체의 경우와 조인트에 다양한 제약 조건이 주어진 경우

로 나누어 설명하겠다.

### 5.1 계층 구조로 연결된 다관절체

계층 구조를 이루는 각 세그먼트들은 조인트로 연결된 다른 세그먼트에 작용하는 힘에 의한 영향도 받기 때문에, 조인트를 통하여 전달되는 힘을 고려해 주어야 한다. 제약 운동학(constrained dynamics)에서는 조인트를 통하여 전달되는 힘을 세그먼트의 동역학 조건들과 조인트에서의 제약 조건들로 구성된 선형 방정식을 사용하여 구한다. 이러한 방법은 선형 시스템을 구성하기가 까다롭고, 복잡한 계산을 필요로 하므로, 사용자의 제약이 빈번한 대화형 시스템에는 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 연결된 세그먼트간에 전달되는 힘을 해결하기 위하여, 4장에서의 방법을 확장하여 사용한다.



(a) 드래킹하는 경우 (b) 그룹화 과정 (c) 단순화된 모델

그림 5 모델의 단순화

제시하는 방법의 기본 아이디어는 제약이 가해지는 특정한 세그먼트를 기준으로 우선 순위를 부가하고, 연결된 세그먼트들을 소그룹들로 나누어 처리하는 것이다. 그림 5.(a)에서와 같이  $n$ 개의 물체  $O_1, O_2, \dots, O_n$ 가 연결된 다관절체에 대하여,  $O_i$ 가 고정되어 있고, 이것에  $O_j$ 가 점대점 조인트로 연결되어 있다고 가정하자. 이 경우에는  $O_j$ 에 연결된  $O_{j+1}, O_{j+2}, \dots, O_k$ 를 모두 하나의 소그룹  $G_j$ 로 설정한다면, 4장에서 제시한 제약 해결 방법을 사용할 수 있다. 이 때 세그먼트  $O_j$ 의 질량은  $G_j$ 로 그룹된 세그먼트들의 전체 질량으로 간주하며, 기하학적 모양은 빠른 계산을 위하여 원래의  $O_j$ 와 같다고 가정한다. 따라서,  $G_j$ 에 가해지는 강제적인 이동과 회전은  $O_j$ 에 적용되고,  $O_{j+1}$ 에 대해서도 같은 방법으로  $O_{j-2}, \dots, O_k$ 를 소그룹으로 나누어 점차적으로 구할 수 있다.

여러 세그먼트들을 드래킹할 경우에는, 선택된 세그먼트들이 각각 원하는 위치와 방향으로 고정된다. 이 경우에는 Weil의 방법[16]과 비슷하게, 고정되는 세그먼트

를 중심으로 독립된 그룹들로 나누고, 각 그룹별 무게 중심을 기준으로 처리한다. 각 소그룹 내 세그먼트들에 대하여는 그림 5에서와 같이 점차적으로 처리한다.

특정한 제어가 없이 자유롭게 움직이는 경우에는, 세그먼트들이 연결된 계층 구조에 따라 각각 움직일 수 있다. 예를 들어 다관절체가 토르소(torso)를 중심으로 하는 인체와 비슷한(human-like)구조를 이루고 있다면, 토르소를 기준으로 연결된 세그먼트들의 위치를 결정한다. 각 세그먼트의 위치는 그림 5.(c)에서와 같이 토르소에 직접적으로 연결된 세그먼트를 기준으로 소그룹으로 나눌 수 있으며, 소그룹 내에 속한 세그먼트에 대하여 제시한 방법에서와 같이 점차적으로 위치를 구할 수 있다. 또한, 동적인 동작의 안정성을 위하여 무게 배분에 따른 가중치를 두어, 소그룹의 우선 순위에 따라 위치를 정하게 함으로써 더욱 효과적인 동작을 생성할 수 있다.

### 5.2 다양한 조인트에서의 제약 해결

계층 구조를 가지는 다관절체의 경우에는, 상위 세그먼트에 연결된 하위 세그먼트에 대하여 해당 조인트에 제약 조건들이 다양하게 부여되는 경우가 많다. 이러한 다양한 제약들은 회전 방향에 대한 제약이나 회전각의 한계 범위와 같은 조건들로 주어지므로, 자연스럽게 동작을 생성하기 위해서는 이러한 제약들에 대하여도 다루어야 한다. 본 절에서는 조인트를 통하여 세그먼트에 전달되는 힘이 조인트에 주어진 제약 조건을 만족시키는 값이 되도록 처리하는 과정을 설명한다.

조인트에 주어진 회전 제약으로 인한 세그먼트의 방향 오차값은 update 과정 후 나타난 기하학적 관계로부터 얻을 수 있다. 본 방법은 세그먼트의 방향 오차값  $\delta\omega$  를 최소화하기 위하여, 먼저 제약이 주어진 조인트에서의 기준축을 설정한 뒤, 축을 이루는 세 방향 벡터들 각각에 대해 방향 성분을 수정하는 과정으로 이루어진다. 이를 설명하기 위하여, 기준축은 방향 벡터  $r_1$ 이 주어지면,  $r_1$ 에 수직인 두 방향 벡터  $r_2$ 와  $r_3$ 로 이루어진다고 가정한다.

그림 6.(a)는  $r_1$  방향에 대하여만 회전이 가능하여 회전에 대한 자유도가 "1"인 경우이다. 이 때, update 단계에서 세그먼트 a의 움직임으로 인하여 세그먼트 b에 전달되는 회전량은 해당 조인트에 제약이 주어진 방향인  $r_2$ 와  $r_3$ 에 대해서도 회전의 전달량을 포함하게 되는 경우가 대부분이다. 이러한 전달량에 따른 회전의 오차를 처리하기 위하여, 본 방법에서는 기준축의 각 방향 벡터  $r_1, r_2, r_3$  각각에 대하여 발생된 회전값을 이용하는데, 이 값들은 update 과정 후 변화된 세그먼트의

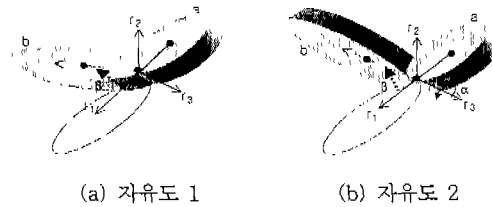


그림 6 운동학적 제약 조건

회전량을 각 방향 벡터들에 대하여 정사영시킴으로써 그 회전량을 알 수 있다. 이 때, 본 방법에서 다루는 회전에 대한 오차값은 제약이 주어진 방향에 대한 회전 변화량만으로 가정한다. 따라서, 그림 6.(a)와 같은 경우의 방향 오차값은 제약이 주어진 방향인  $r_2$ 와  $r_3$ 의 방향 벡터의 회전 값이 되며, 이 값은 4장에서와 같이 강제 회전을 가함으로써 수정된다. 기준축을 A라 하고 제약이 주어진 방향을  $r_k$ 라 한다면, 구하는 강제 회전값은 아래 식으로 계산된다.

$$\delta R_{ab}(A_k, \theta_k) = -\delta\omega \cdot r_k \quad (2 \leq k \leq 3)$$

여기서,  $r_k$ 는  $r_2$ 와  $r_3$ 와 같이 제약이 주어진 방향 벡터를 나타내므로,  $\delta\omega \cdot r_k$ 는 update과정 후 갱신된 회전량 중에서  $r_k$  방향으로 회전된 세그먼트의 회전량을 가리킨다. 이 회전량은 제약을 벗어난 해당 회전량이 되고, 이를 수정하기 위한 강제 회전  $\delta R_{ab}$ 로 처리한다. 즉, 강제 회전  $\delta R_{ab}(A_k, \theta_k)$ 에서  $A_k$ 는 기준축 A의  $r_k$  벡터 방향을 가리키며,  $\theta_k$ 는  $r_k$  방향으로 갱신된 회전량을 나타낸다.

다음으로, 그림 6.(b)에서와 같이 회전각에 대한 제한 범위를 가지는 경우에 대하여도 고려해야 한다. 제한각  $\beta$ 가  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ 의 범위로 주어진다면, 위의 방법으로 구해진 각 방향 벡터의 성분 중에서  $\theta_{min} \leq \theta_k \leq \theta_{max}$ 의 범위를 벗어나는 양은 제거한다. 이러한 강제 회전값은 제약 조건을 해결하는 adjust 단계에서 처리되는 강제 회전  $R_{ab}$  값에  $\delta R_{ab}(A_k, \theta_k)$ 를 추가하여 처리된다.

## 6. 실험 결과

본 장에서는 위치 기반으로 동작을 처리하는 본 논문의 방법을 이용하여, PC 환경에서 다관절체의 동작을 대화형으로 실시간에 생성한 결과를 보인다. 실험에 사용된 다관절체는 인체 모형을 간략화시킨 피노키오 인형으로, 14개의 세그먼트들과 이들을 연결하는 13개의



해당 조인트들로 구성하였다. 각 세그먼트들은 그림 9에서 제시된 계층 구조와 물리량을 가진다.

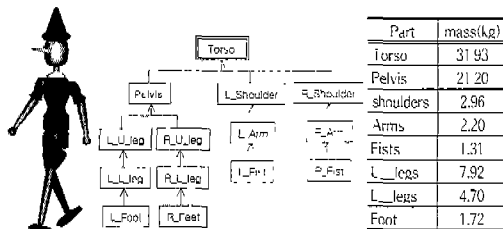
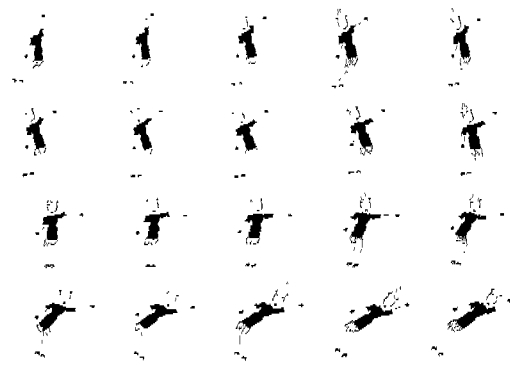


그림 9 다관절체 모델 및 계층 구조와 물리량

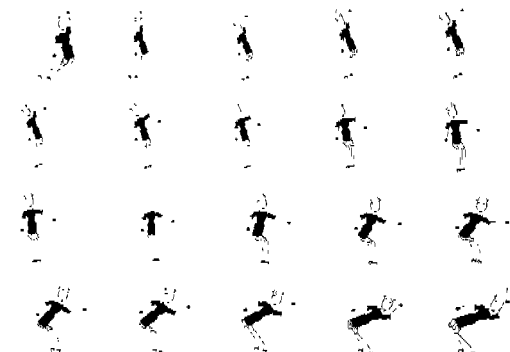
본 실험에서는 피노키오의 한 부분을 선택하고, 이를 대화형으로 조절하여 생성되는 다관절체의 움직임을 보인다. 이때 생성되는 동작은 사용자가 제어하는 외부 힘, 환경 요인, 그리고 조인트의 제약을 위해 가해지는 힘들이 적용되어 만들어진다. 그림 10과 그림 12는 실험의 결과 화면들을 나타낸 것이며, 이 예제의 생성에 사용된 컴퓨터는 128MByte의 RAM 을 가진 PentiumIII 600MHz급 PC이고, 소프트웨어로 구현된 OpenGL 라이브러리를 사용하여 렌더링하였다. 피노키오 모형은 총 16,416개의 다각형으로 구성되었고, 생성된 움직임은 초당 평균 40~50프레임의 속도로 피노키오의 움직임을 생성하였다.

그림 10은 피노키오를 잡아 당길 때 생성되는 움직임의 주요 장면들이며, 이들은 세그먼트들의 물리량과 환경 요인의 속성에 따라 다양한 동작을 보인다. 그림 10.(a)는 각 세그먼트들의 질량을 일정한 값으로 하고, 움직임의 장애 요소를 주기 위한 댐핑 값을 그림 10.(b)의 예제에 비해 상대적으로 큰 값으로 설정하여 만들어진 결과 장면들이다. 그림 10.(b)에서는 각 세그먼트의 질량을 본 논문에서 사용하는 일반적인 인체 표준량[22]으로 설정하여 생성된 장면들이다. 제시된 그림에서와 같이, 자기 우주나 바다 속에서 움직이는 것과 같은 동작을 보였고, 이들의 각 시뮬레이션을 행한 결과를 그림 12에 제시하였다. 그림 12.(a)는 화면의 왼쪽에서 오른쪽으로 잡아당기는 힘과 이에 따른 궤적을 정면에서 측정한 각도로 나타낸 것이며, 그림 12.(b)(c)(d)는 이를 적용하여 생성된 오른쪽 어깨와 골반 그리고 무릎에서의 관절각 궤적들을 각 프레임 단위로 나타낸 것이다.

각 그림에서 두 궤적을 비교해 보면, 사용자의 동일한 제어에 대하여 작은 댐핑 값을 가지는 대상 캐릭터의 어깨 관절각이 더 큰 값을 가지며, 그 변화 속도도 빠름을 알 수 있다. 또한, 질량표준치로 설정한 캐릭터의



(a) 동작 예제 1 (damping:0.5)



(b) 동작 예제 2 (damping:0.3)

그림 10 다관절체를 잡아 당길 때 생성되는 동작의 예

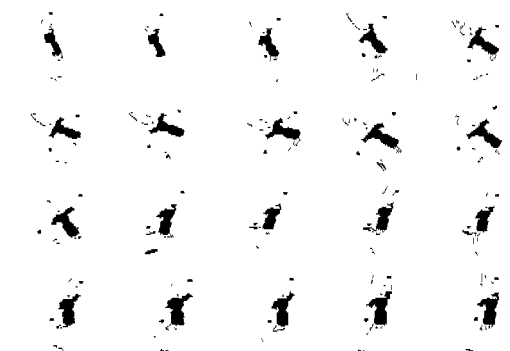


그림 11 사용자 제어에 의해 반항하는 동작의 예

움직임이 그렇지 못한 경우에 비해 훨씬 사실적인 움직임을 나타내고 있다. 이와 같은 결과로, 힘과 무릎에서의 관절각도 그 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 그리고, 본 실험에서는 두 궤적들이 속도나 크기에서 차이를

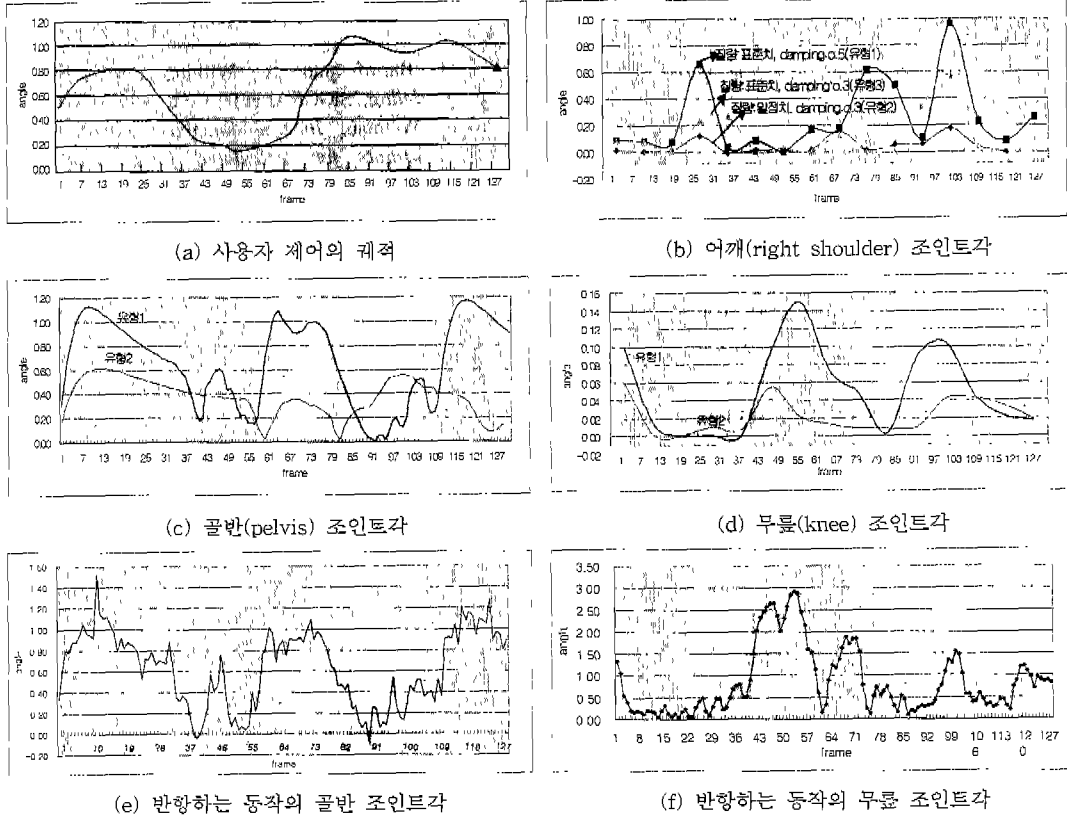


그림 12 관절각 궤적 비교

나타낸 것과는 달리, 그 관절각 궤적의 특성은 비슷하게 생성되어 사용자의 제어에 따른 일관성 있는 반응을 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안하는 방법은, 상당히 짧은 처리 시간으로 조인트에서의 제약을 해결하여, 자연스러운 동작을 실시간으로 생성할 수 있다. 또한, 물리량의 간단한 조작으로 움직임의 최대 크기와 환경 요인에 따른 움직임을 다양하게 생성할 수 있음을 보인다.

그림 11는 피노키오를 당기는 외부의 힘에 대하여 피노키오의 저항하는 움직임이 더해지는 경우의 주요 장면들이다. 이 저항하는 움직임은 외부 힘에 대응되는 크기(amplitude)와 주기(frequency)값의 변수를 이용하여, 아래와 같이 noise 함수[23] 등을 적용하여 그 값을 구하였다.

$$u(t) = \text{noise}(\text{amplitude}) \cdot \text{noise}(\text{frequency}(t))$$

amplitude는  $\sin(\mathbf{r} \cdot \mathbf{f}) \cdot e^{-\mathbf{x} \cdot \mathbf{h}}$ 로, frequency는  $\cos(\mathbf{v} \cdot \mathbf{f}) \cdot e^{-\mathbf{x} \cdot \mathbf{h}}$ 의 함수를 이용하여 계산하였다. 여기서  $\mathbf{r}, \mathbf{f},$

$\mathbf{v}$ 는 세그먼트의 크기와 방향 성분, 외부 작용 힘, 그리고 이전 단계에서의 세그먼트의 속도를 각각 나타내며, 이들 벡터들이 이루는 각  $\theta (-\pi \leq \theta \leq \pi)$ 를 이용하여 저항의 크기와 주기를 결정하였다. 이렇게 구해진 저항값  $u(t)$ 는 update단계에서, 각 세그먼트의 위치  $\mathbf{x}(t + \Delta t)^{\text{update}}$ 에 각 방향 벡터 성분의 상수값으로 더해져서 원래의 위치가 랜덤(random)하게 달라지도록 하여, 물체가 저항하는 듯한 느낌을 주는 데에 적용되었다. 이 결과 생성된 관절각의 궤적의 한 예로 그림 12.(e)(f)에서 제시하였다. 이것은 그림 12.(c)(d)에서의 유형1에 해당되는 캐릭터의 움직임에 저항 요소를 추가하여 생성된 결과이다.

본 실험에서는 다관절체의 물리량과 환경 요인을 효율적으로 적용함으로써, 다루는 캐릭터가 우주 공간이나 바다 속과 같은 가상 공간에 존재하는 것처럼 동작을 달리 생성할 수 있었다. 또한, 위치 기반으로 동작을 생성하는 본 방법은, 대화형 시스템에서 다관절체의 움직

임을 쉽게 제어할 수 있음을 보였다. 이러한 특징들은 애니메이션이 상대적으로 적은 노력으로 다양한 환경에서 캐릭터들의 움직임을 쉽고 빠르게 생성할 수 있도록 할 것으로 기대된다.

## 7. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 PC 환경에서 대화형으로 다관절체의 동작을 생성하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해, 다관절체의 동작 특징인 제약이 주어진 동역학적 움직임을 빠르게 해석할 수 있는 절차적 방법을 제안하였고, 이 방법을 다관절체를 제어하는 시스템에 대화형으로 적용하는 방법들을 보였다.

본 논문에서 제안하는 절차적 방법은 기존의 가속도나 속도 기반으로 제약을 해결하기 위해 필수적이었던 복잡한 계산이나 선형 시스템의 풀이과정을 피하여, 위치와 방향 기반의 간단한 해법으로 제약 조건을 해결하였다. 이 제약 해결 방법을 이용하여 복잡한 다관절체의 동작을 생성할 수 있는 방법들을 제시하였고, 사용자의 제어에 따라 생성된 캐릭터의 동작 결과를 보였다. 특히, 생성되는 캐릭터 동작의 현실감을 높이기 위하여 가상 공간의 환경 요인과 사용자가 가하는 제어에 반응하여 움직이게 하였다.

본 논문에서 제안하는, 위치 기반으로 동작을 생성하고 제어하는 방법은 물리 기반의 모델링과 동역학 법칙에 의한 움직임을 기본으로 하므로, 비교적 사실적인 동작을 생성할 수 있다. 생성된 동작이 지켜야 하는 제약 조건들을 절차적인 방법으로 해결함으로써, 빠른 시간에 다관절체의 동작을 생성할 수 있으며, 환경의 물리적 요소와 다관절체의 질량과 같은 물리적 속성을 자유롭게 반영할 수 있어 비교적 적은 노력으로 다양한 환경에서 캐릭터의 동작을 쉽게 생성할 수 있다. 특히, 대화형 시스템에서 다관절체의 원하는 부분을 끌거나 특정한 부위를 흔드는 경우에 다관절체의 움직임을 안정적이면서 빠르게 생성할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법은 사용자가 직접 조작할 수 있는 인형극 시스템이나, 동화 속의 인물을 가상 공간에서 직접 동작시킬 수 있는 교육용 프로그램 등에서 직접적으로 사용될 수 있을 것이다. 또, 음악과 같은 외부 입력에 반응하여 동작을 생성하도록 함으로써, 춤추는 동작 등의 자동 생성에도 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 다관절체로 형성된 물체가 벽이나 다른 다관절체와 같은 물체에 충돌할 때 발생하는 충돌 처리에 대한 연구가 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] D. Baraff and A. Witkin, *Physically Based Modeling*. SIGGRAPH'99 Course Note, 1999.
- [2] C. Welman. *Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation*, Master's thesis, Simon Fraser University, 1993.
- [3] J. K. Hodgins, et al., "Animating human athletics," *SIGGRAPH'95*, Vol.29, pp.71-78, 1995.
- [4] Michael Gleicher, "Motion Editing with Spacetime Constraints," *Proc. of Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.139-148, 1997.
- [5] R. Barzel. "Faking dynamics of ropes and springs," *IEEE CG&A*, Vol.17, No.3, pp.31-39, 1997.
- [6] J. W. Lee, et al., "A procedural approach to solving constraints of articulated bodies," *EuroGraphics 2000*, short presentations, pp.55-64, 2000.
- [7] R. L. Cook. "Stochastic sampling in computer graphics," *ACM TOG*, Vol.5, No.1, pp.51-72, 1986.
- [8] D. R. Peachey, "Modeling waves and surf," *SIGGRAPH'86*, Vol.20, pp.65-74, 1986.
- [9] K. Perlin. "An Image Synthesizer," *SIGGRAPH'85*, Vol.19, pp.287-296, 1985.
- [10] Charles Rose, Brian Guenter, Bobby Bodenheimer and Michael F. Cohen, "Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints," *SIGGRAPH '96*, Vol.30, pp.147-154, 1996.
- [11] Michael Gleicher, "Retargetting Motion to New Characters," *Proc. of Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.33-42, 1998.
- [12] S. Sudarsky and D. House, "Motion Capture Data Manipulation and Reuse via B-splines," *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, Vol.1537, pp.55-69, 1998.
- [13] W. W. Armstrong and M. W. Green, "The dynamics of articulated rigid bodies for purposes of animation," *The visual Computer*, Vol.1, No.4, pp.231-240, 1985.
- [14] P. M. Issacs and M. F. Cohen, "Controlling dynamics simulation with kinematic constraints behavior functions and inverse dynamics," *SIGGRAPH'87*, Vol.21, pp.215-224, 1987.
- [15] A. Fournier and W. T. Reeves, "A simple model of ocean waves," *SIGGRAPH'86*, Vol.20, pp.75-84, 1986.
- [16] J. Weil, "the synthesis of cloth objects," *SIGGRAPH'86*, Vol.20, pp.49-54, 1986.
- [17] V. Milenkovic, "Position-based physics: simulating the motion of many highly interacting spheres and polyhedra," *SIGGRAPH'96*, Vol.30, pp.129-136, 1996.

- [18] J. D. Gascuel and M. P. Gascuel, "Displacement constraints for interactive modeling and animation of articulated structures," *The Visual Computer*, Vol.10, pp191-204, 1994.
- [19] J. Baumgarte, "Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems," *Computer Methods in Applied Mechanics*, Vol.1, pp.1-36, 1972.
- [20] M. Kass, *An introduction to continuum dynamics for computer graphics*, SIGGRAPH'94 Course Note, 1994.
- [21] Tcukolski, Vetterling, and Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.
- [22] F. Faure, et al., "Dynamic analysis of human walking," *Computer Animation and Simulation '97*, pp53-65, 1997.
- [23] D. S. Ebert, et al., *Texturing and Modeling a Procedural Approach*, Academic Press, 1994.

배 회 정

정보과학회논문지 : 시스템 및 논  
제 28 권 제 9 호 참조

백 낙 훈

정보과학회논문지 : 시스템 및 논  
제 28 권 제 9 호 참조

이 종 원

정보과학회논문지 : 시스템 및 논  
제 28 권 제 9 호 참조

유 관 우

정보과학회논문지 : 시스템 및 논  
제 28 권 제 9 호 참조