■ 應用論文

Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol 12, No.1 1993

인체 모델의 컴퓨터 형상화 방법+

(A Survey on Human Figure Representation in Computer Graphics+)

한치근* · 정의승**

Abstract

In this paper, methods of human figure representation in computer graphics are described. Many applications of the human figure representation are found in areas including industry, advertisement, and cartoon production and further research for the methods that show the human figure more realistically is expected.

Two analytic methods for human model, kinematics and dynamics, are explained and the characteristics of the man-machine interface systems that include human figure representaion are presented. Various techniques of the human figure representation based on kinematics or(and)dynamics are discussed and representation methods of human body segments such as hand, face, spine are introduced in this paper.

Ⅰ. 서 론

Hudson이 1950년대 후반 처음으로 컴퓨터 그래픽스라는 단어를 사용한 이후[12], 컴퓨터를 이용한 영상의 제작은 컴퓨터 처리 속도가 빨라지고 하드웨어의 가격이 저렴해지면서 많은 응용 분야에서 사용되고 있다. 간단한 메뉴 인터페이스의 작성에서부터 비행기, 자동차의 설계에 사용되는 복잡한 CAD 시스템에 이르기까지 컴퓨터 그래픽스를 이용한 화면의 제작이 이제는 사용자의 편이를 위해서 필수적이라 하겠다. 그래픽으로 표현된 정보는 글, 문장으로 작성된 정보보다 사용자에게 신속하고도 간결하게 그 정보를 전달할 수 있으며, 지금까지 그래픽을 이용하지 않던 여러 소프트웨어들을 그래픽 환경하에서 사용할 수 있고 입출력을 간단히 그래픽으로 처리할 수 있도록 하는 것이 현재의 소프트웨어 산업의

+ 이 논문은 1992년 한국 과학 재단의 특정 기초 연구비에 의하여 연구되었음.

* 경희대학교 전자공학과
** 포항공과대학교 산업공학과

추세중의 하나라 하겠다.

간단히 정지 영상을 제작하던 단계에서 컴퓨터의 처리 속도가 빨라지면서 움직이는 애니메이션(Animation)의 제작으로 컴퓨터 그래픽스는 발전하여 현재는 TV의 상업 광고 제작, 기계 설계 및 기계의 역학적 모의 실험, 대기의 순환 과정의 모형 개발, 게임 소프트웨어의 개발, 인체 운동의 모의 실험등 움직임을 표현하여야 하는 분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

인간-기계 인터페이스 시스템 또는 인체 모델 CAD 시스템(Man-Modelling CAD Systems)에서의 모의 실험 과정에서 인간이 포함되어 있는 상황하에서는 인체를 컴퓨터 그래픽스를 이용하여 표현하는 과정이 필수적이다. 예를 들어, 자동차의 운전석을 CAD를 이용하여 설계할 때 운전자의 사용성 평가를 설계단계에서 수행할 수 있다면 시간, 경비면에서 많은 절약을 할 수 있다[9]. 따라서 설계와 평가를 동시에 수행하기 위해서는 인체 모델을 CAD 시스템내에 표현하는 것이 요구된다. 또한 다리의 장애를 갖고 있는 사람을 대상으로 장애의 정도를 결정하고 장애자에게 걸음 교정을 제공하는 시스템에서는 장애자의 움직임과 정상인의 다리 움직임을 서로 비교하여 화면상에 보여주는 것이 필요하며[8], 사건 목격자들의 정보로 부터 범인의 인상을 재구성할 때 이차원적인 사진 보다는 3차원의 영상이 범인 인식에 더욱 효과적일 것이다[41]. 이를 위해서는 인간 얼굴의 특성을 파악하고 그 특성을 컴퓨터 내에 어떻게 표현하며 재구성하여야 하는가를 알아야 한다.

인체를 컴퓨터 형상으로 만드는 기본적인 방법은 인체를 관절(Joint)과 강체(Rigid Segment)로 구성되어 있는 하나의 단순한 관절 모델(Articulated Model)로 표현하는 방법이며, 그 예가 그림 1에 표현되어 있다[9].

이러한 단순한 모델로 표현된 인체 모델

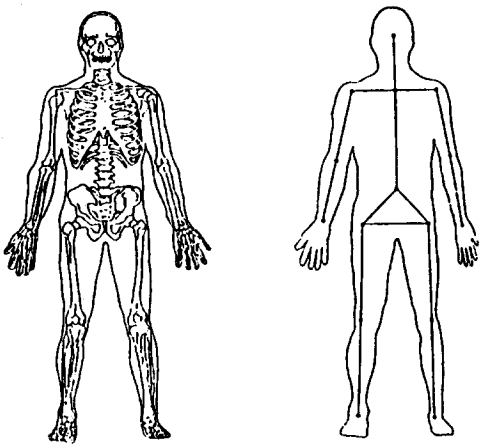


그림 1. 인체 관절 모델의 예

에서 있어서도 동작을 부여하는 것이 간단한 일은 이니다. 왜냐하면, 인체는 많은 수의 관절과 지체들로 구성되어 잇고 각 관절들은 다양한 형태의 동작을 수행하며, 각 관절과 지체들은 상호 종속적으로 동작하기 때문이다. 또한 정밀한 동작을 표현하기 위하여 많은 관절과 지체를 인체 모델에 포함시키면, 각 지체의 위치를 계산하는데 막대한 시간을 필요로 한다. 따라서, 실시간 처리를 수행하기 위해서는 단순화된 인체 모델이 필요하다. 그러나, 너무나 단순화된 인체 모델은 현실감이 떨어지게 되는데 그 이유는 인체는 관절과 지체로만 구성된 것이 아니라 지체와 지체를 연결시켜 주고 있는 근육(Muscle)과 살(Flesh)을 포함하고 있기 때문이다.

로보틱스 분야에서는 로보트의 움직임을 지정하고 묘사하기 위하여 관절이 있는 모델(Articulated Model)의 운동에 대하여 많은 연구가 이루어졌으며, 생체 역학(Biomechanics) 분야에서도 많은 연구가 수행되었다[2, 50, 13, 27, 34, 24, 30]. 관절이 있는 모델에서는 인체가 연구의 대상이 되고 로보트의 모의 실험 환경으로는 컴퓨터 그래픽이 사용되고 있다. 따라서 컴

퓨터 그래픽스 분야에서는 로보틱스와 병행하여 인체 모델의 표현과 사물의 움직임을 묘사하기 위한 연구가 대두되었다[52].

로보트에게 자연스러운 움직임을 부여하기 위하여 인체의 운동을 연구하고 그 연구로 부터 언어진 결과를 컴퓨터상의 인체 모델에 적용한 후 컴퓨터 그래픽을 이용하여 그 모델의 움직임을 관찰한다. 이때 모델의 운동이 현실감이 있을 때 비로소 우리는 인체 운동의 연구 결과가 올바르다고 판단할 수 있다. 따라서, 컴퓨터 그래픽스는 단순히 영상을 보여주기 위한 수단만이 아니고 로보틱스와 생체 역학의 모의 실험을 가능케 하여 주는 수단을 포함하고 있는 종합적인 분야로 인식될 수 있다. 인체와 관련된 주위 환경 요소를 고려하기 위해서는 기본적인 물리학 법칙들의 표현이 그래픽 소프트웨어내에 포함되는 것이 필수적이나, 현실감있는 영상의 재현은 계산 속도의 희생이 요구되므로 개발자는 현실감과 실시간 처리의 균형을 유지하여야 한다.

인체 모델이 사용되는 각 응용분야의 특성에 따라 인체중 표현하고자 하는 부분이 다를 수 있으며 관심있는 모의 실험 결과치도 각 응용에 따라 여러가지로 변화할 수 있다. 예를 들어 자동차 충돌 모의 실험에서는 인체 모델의 전체적인 움직임과 인체에 가해지는 충격의 표현이 중요하며[54], 다리가 있는 로보트의 운동 연구에서는 인체 모델의 보행, 즉 다리 운동이 주관심사이며 보폭, 속도, 무릎 각도가 모의 실험의 중요 결과치가 된다[7].

본 논문에서는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 연구 개발되어진 여러가지 인체의 표현 기법을 소개하였으며, 2장에서는 먼저 인체 모델의 전체적인 움직임을 표현하는 중요한 접근 방법인 Kinematics와 Dynamics를 설명한다. 그리고, 인간-기계 인터페이스 시스템에서 나타난 인체 모델을 비교 설명하고 다음으로 주위 환경보다는 인체 표현에 중점을 둔 인체 표현 방법들을 소개한다. 손, 얼굴, 등뼈등 인체 부분들의 자세한 컴퓨터 그래픽스 묘사 기법들을 3장에서 설명하고 4장에서 결론을 맺었다.

Ⅱ. 인체 모델 표현 방법

본장에서는 인체의 움직임을 분석하는 기본적인 접근 방식인 Kinematics와 Dynamics를 설명하였다. 그리고, 인간과 기계의 상호 작용의 모의 실험 과정이 CAD 시스템내에 있을 경우, 그 모의 실험에 사용되는 인체 모델 측면을 비교 설명하였다. 이들 인간-기계 인터페이스 시스템에서 사용된 인체 모델은 주로 Kinematics를 바탕으로 하고 있다. 인체 모델 자체 보다는 인체와 기계와의 공간적인 위치를 확인하려는 연구(Collision Detection, Path Planning 등)가 중심이라고 하겠다. 마지막으로 인체의 주위 환경보다는 인체의 표현이 중심이 되어 정확한 동작의 묘사에 비중을 둔 인체의 표현 방법들을 소개하였다.

2-1. Kinematics와 Dynamics

Kinematics를 이용하여 인체의 움직임을 표현하는 방법은 인체의 각 지체의 위치와 관절들의 각도를 힘과 회전력(Torque)이 없는 상태로 가정하여 계산하는 것을 기본으로 한다. Keyframing 기법은 Kinematics의 기본적인 기법이라 하겠다. 인체 모델의 표현에 Dynamics를 채택한 방법에서는 Kinematics에서 고려하지 않은 힘(근육에서 발생하는 내부힘과 외부 환경에서 주어지는 외부힘)과 회전력을 기본으로 하여 지체의 가속도를 계산한다. 각 지체의 가속도를 총합하면서 영상을 만들면 현실감있는 인체의 애니메이션이 만들어 진다는 것이 기본 가정이다[58, 8].

인체의 움직임이 느리고 인체가 항상 지

면에 위치하고 있으면 Kinematic 표현 방식으로도 바람직한 인체 모델의 애니메이션을 만들 수 있으며, 만화제작과 인간-기계 인터페이스 시스템의 표현에 사용된다. 그런, 다양한 운동을 여러 다른 속도로 표현하려면 다량의 Kinematic 자료를 준비하여야 하는 단점이 있다[8]. 동물의 동작을 표현하는 방식인 Benesh 표기 방식[47], Eshkol-Wachman 표기 방식, Labanotation[8]등으로 표기된 인체 동작의 데이타를 영상으로 만드는 작업도 Kinematics를 바탕으로 하고 있다.

Kinematics는 다시 Forward Kinematics와 Inverse Kinematics로 나뉘게 된다. 예를 들어 어깨 관절부터 손끝 사이의 움직임을 표현하는 인체 모델을 고려해 보자. 어깨 관절부터 각 관절의 각도를 주고 각 지체의 길이가 주어지면 손끝의 위치를 3차원 공간상에서 유일하게 결정할 수 있다. 이러한 접근 방식을 Forward Kinematics라 하고 Inverse Kinematics에서는 지체들의 길이와 손끝의 위치만을 지정하고 손목, 팔꿈치의 각도를 계산하여 팔의 영상을 만든다. 예를 들어 Pelvis에 고정된 다리에서 발의 위치를 부여하고 간단한 Inverse Kinematics를 이용하여 다리의 형상을 계산하면 다음 그림 2와 같은 두가지 결과를 얻을 수 있[14].

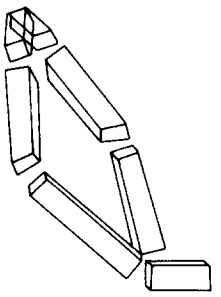


그림 2. Inverse Kinematics에 의한 하지의 움직임

이 그림에서의 두 상태는 같은 발의 위치를 제공하지만 한 상태는 현실에서는 불가능한 상황이 계산 결과로 부터 얻어질 수 있다는 것을 설명하고 있다. Inverse Kinematics에서는 각 관절들의 허용 범위와 인체가 취하는 동작, 즉 움직임의 자연스러움에 대한 역학적 고려가 이루어져야만 실제적인 영상을 얻을 수 있다.

자동차 충돌 모의 시험, 로보트의 운동 모의 시험, 스포츠 연구, 생체 역학에 사용되는 Dynamics는 인체 모델의 현실감있는 애니메이션을 만들기 위하여 이용된다. 사람이 점프하는 형상이나 손을 자연스럽게 내리는 영상, 물체를 들어 올리는 동작등의 묘사에 외부와 내부의 힘과, 회전력, 인체 무게등이 포함되면 실제적인 느낌을 줄 수 있다[39]. 그러나 이 분석 방법은 결과를 계산하는데 많은 시간이 소요되고 근육에서 발생되는 힘의 측정이 어려우며, 표현하고자 하는 인체 모델이 복잡해질수록 계산의 안정성(Numerical Stability)이 결여된다는 문제점을 갖고 있다[52]. 운동에 포함되는 관절과 지체의 수가 적고 힘과 회전력의 표현이 중요한 경우에는 현실감있는 영상을 만들기 위하여 Dynamics를 이용하는 방법이 바람직하다고 하겠다.

2-2. 인간-기계 인터페이스 시스템의 인체 모델

설계자가 CAD 시스템을 이용하여 기계를 설계하고 시험용으로 제작된 제품을 인간 공학자가 평가하던 작업이 CAD 시스템 내에 인체 모델을 첨가하면서 하나의 통합적인 시스템이 되었다. 이 때 설계하고자 하는 기계나 설비의 용도에 따라 필요한 인체 모델은 각기 다를 수 있으며 모의 실험의 중요한 평가 변수도 변할 수 있다.

1960년 Fetter가 처음으로 "Landing Signal Officer(LSO)"를 개발한 이후 여러

가지의 인체 모델을 포함한 CAD 시스템이 개발되었다. LSO는 비행기 조종사가 항공모함에 착륙하려고 접근할 때 보이는 신호수의 위치, 크기를 모의 실험하는 시스템이였다. 이후 Fetter는 보잉 비행기 조종실의 설계에 7개의 지체를 갖고 있는 "First Man"을 포함시켰다(그림 3-a). 이 때의 인체모델의 치수는 미국 남자의 평균으로 고정되었으나 Fetter는 그 이후 "Second Man", "Third Man System", "Third Woman", "Fourth Man and Woman"을 개발하면서 여러 수준의 치수를 부여하고 관절의 수를 늘려서 다양한 인체 모델을 표현하게 되었다[12].

1969년에 보잉사는 평균 남자의 크기를 기준하여 비례적으로 변할 수 있는 23개의 관절을 갖고 있는 인체 모델 Boeman(그림 3-b)을 만들었다[11]. 손이 위치하고자 하는 지점, 수행하는 동작의 순서들을 사용자가 입력으로 지정하여야 하며 전체 시스템은 일괄 처리 방식으로 수행되었다. 이 모델은 인체 표현의 지나친 단순화라는 단점과 대화형 시스템들이 출현함에 따라 사용성이 저하되었다.

미국 크라이슬러사에서 개발한 Cyberman(그림 3-c)은 Cybernetic Man-Model을 의미하며 15개의 Link를 갖고 있으며 각 관절의 각도는 사용자가 대화식으로 지정하게 되어 있다. 자동차를 중심으로 하여 운전자, 승객, 운전상태, 트렁크를 여는 과정의 모의 실험으로 주로 사용되고 있다. Cyberman의 지체 표현방식은 철사 그물 형태를 이용하고 있으며 표현형태의 복잡성으로 인하여 인체 모델과 평가하고자 하는 시스템의 구별이 용이하지 않다는 단점을 가지고 있다[44, 38].

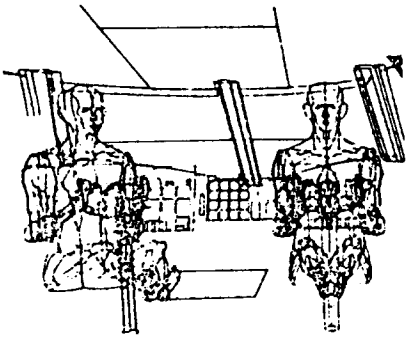
15개의 링크를 갖는 BUFORD(그림 3-d)는 Polygon을 이용하여 인체를 표현하며 일반적인 Reach와 작업자의 움직임을 표현할 수 있다[11]. CAR(Crew Assessment of Reach)는 시스템자체에서 화면을 보여주는 기능을 갖고 있지는 않으나 31개의 링크로 되어 있는 인체를 갖고 인체의 다양한 치수에 대한 모의 실험을 가능케 한다[11].

35개의 링크를 갖고 있며 인체의 살을 표현하기 위하여 타원을 이용한 Combiman (Computerized Biomechanical Man-Model)(그림 3-e)은 타원들이 이루는 외곽선으로 실제적인 모델의 외형을 나타내었다. 또한 각각의 관절각도를 입력하여 지체의 움직임을 표현하며 Visibility Plot및 다양한 형태의 Reach Test가 가능하다[38].

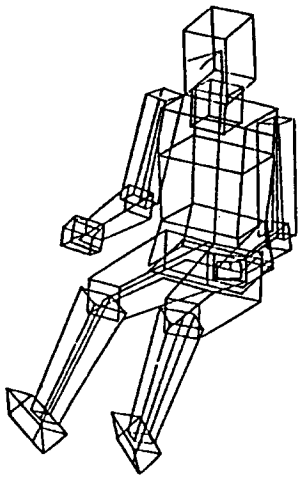
Kingsley et al.에 의하여 개발된 SAMMIE(System for Aiding Man Machine Interaction Evaluation) CAD 시스템은 21개의 링크와 17개의 핀관절을 갖고 있다(그림 3-f)[9]. SAMMIE는 작업자의 Reach Test와 Visibility Test가 가능하다. Reach Test는 특정한 위치까지의 자세을 예측하는 Reach Prediction과 Reach Envelope, 그리고 Reach Volume을 계산하는 3가지 형태로 요약되고, Visibility Test로는 Visibility Chart와 Perspective View를 통해 시야를 나타내는 두가지 방식이 있다. 또한 신체의 길이는 물론 작업자의 뚱뚱함과 여윈 상태를 표현할 수도 있다. 그 후 다른 그래픽 응용 프로그램과의 연관성을 확장시키기 위하여 다양한 기능이 첨가되었다. 또한 IGES형식의 데이타와의 호환이 가능하다[9, 23]. 이 시스템은 특정한 목적의 CAD 시스템과는 달리 일반적인 기계설계, 작업장 설계에 사용될 수 있도록 범용성을 갖고 있다.

자동차 충돌과 같이 외부의 힘에 의한 인체의 운동을 묘사하기 위해서 Willmert는 3차원 실린더로써 인체를 표현하였다. 전체적인 시스템은 3차원의 영상으로 나타나며 이차원 영상을 갖는 충돌 실험으로는 Prometheus 인체 모델이 있다[54].

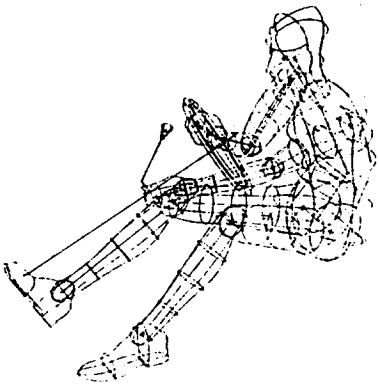
ergoSPACE는 기타 다른 시스템과는 달



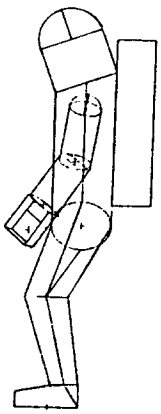
(a) First Man



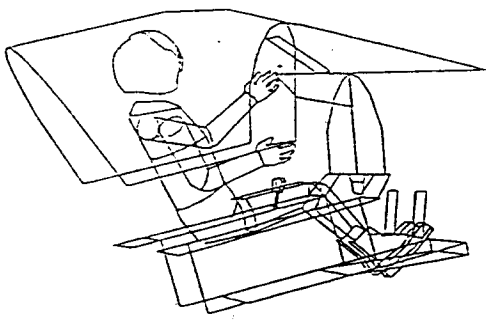
(b) Boeman



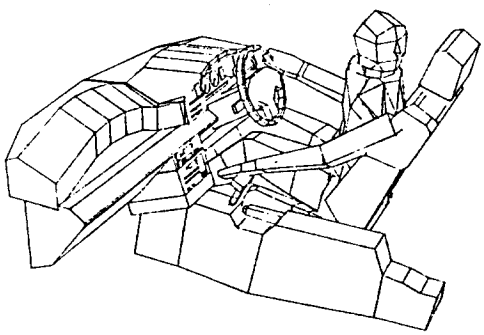
(c) Cyberman



(d) BUFORD



(e) Combiman



(f) SAMMIE

그림 3. 모델별 지체 표현 형태

리 범용 CAD시스템인 AutoCAD를 이용한 시스템으로서 17개의 관절로 이루어져 있다. 2차원 모델인 ergoSHAPE에서 발전한 시스템이며 Stick Figure와 Fleshed Model의 두가지 형태의 인체 표현 방식을 제공하며, 여타 시스템과의 호환을 위하여 DXF Format을 사용하고 있다. 이와 유사한 시스템으로서 Mannequin이 있다. 이 외에 Torqueman, Liftman, Foreman)[36], WERNER, TADAPS 시스템, CREW CHIEF[22], ATB(Articulated Total Body Model)[1]등이 있다.

2-3. 인체의 표현 방법

이 절에서는 다양한 응용을 위하여 연구 개발된 컴퓨터 그래픽스 시스템들을 인체 모델 운동의 표현 특성 측면에서 비교 설명하였으며, 연구 개발의 흐름을 파악하기 위하여 가능한 한 개발순서와 연구자별로 소개하였다.

O'Donnell은 화공 분야에서 화합물의 구조를 이미지로 표현하는 소프트웨어인 GRAMPS을 이용하여 ADAM(A Dial Activated Man)을 구성하였다. 표현된 ADAM은 GRAMPS의 기본적인 명령어에 의하여 간단한 점프, 눕는 동작등을 구사할 수 있다. 단순한 Keyframing 기법을 기본으로 하고 있다.

Herbison-Evans는 NUDES(Numerical Utility Displaying Ellipsoid Solids) 프로그램을 개발하였다. 이 시스템에서 각 지체(살 포함)는 타원형으로 표현되면 전체적으로 20개의 타원을 갖는다. 각 지체가 소세지와 비슷한 형상을 갖고 있으므로 Sausage Person이라고 불린다[19]. 타원이 겹쳐지면서 내부로 들어가는 선의 파악이 쉽고, 처리 속도가 빠른 반면에 안으로 볼록한 형태의 묘사에 어려움이 있다. NUDES로 완성된 예가 그림 4에 나타나 있다[19, 18].

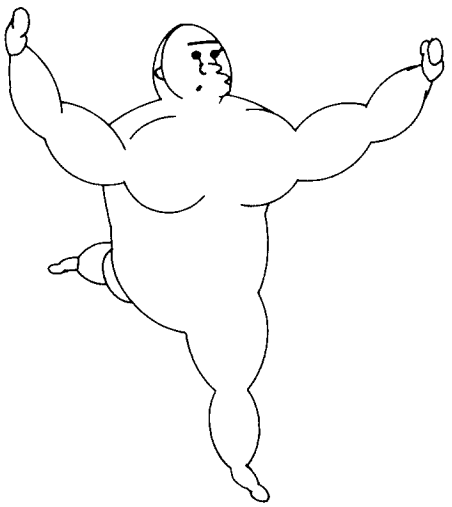


그림 4. Sausage Person

Badler를 중심으로 70년대 후반에 개발된 Bubbleman은 20개의 링크와 19개의 관절을 갖고 있으며 인체를 Sphere와 Bubble의 집합체로 표현하였으며 명암으로 주위 장치와 구별되게 하였다. 또한 인체와 인체, 인체와 장치와의 부딪힘을 파악할 수 있다[5, 11, 8].

1982년 Calvert et al.은 Kinematics에 기초를 두고 있으며, 23개의 지체와 22개의 관절로 이루어져 있는 인체의 컴퓨터 그래픽 모델을 발표하였다. 운동에 대한 입력 데이타로서 Labanotation으로 표기된 자료를 받아 움직임을 컴퓨터 그래픽으로 표현하게 만들었으나, 인체의 물리적인 제한 요소를 고려하지 않았다. 계산된 인체의 움직임은 Stick-Figure로 표현하였다. 지체를 Stick-Figure로 표현하는 방식은 두 Stick이 겹쳤을 경우 어느 지체가 전면에 있는지 파악하는 데 어려움이 있다[8].

Zeltzer는 로보틱스와 그래픽 애니메이션은 같은 개념을 공유한다는 점에 착안하여 관절의 모습을 나타내기 위하여 Motor Control 개념을 도입하였다. 인체의 모든

관절의 변화를 움직임들의 집합으로 인체 모델의 운동을 표현하였다. 예를 들어, 손가락의 움직임은 손가락 하나 하나의 움직임이 아니고 다른 손가락들의 운동과 연관 관계가 있으므로 손가락들간의 운동 연관 관계를 미리 프로그램하여, 속도등과 같은 변수를 변화시켜서 원하는 운동을 재현한다는 것이다. 그는 22개의 자유도를 가진 인체 모델을 고려하였다[56].

Korein과 Badler는 Goal-Directed Motion이라는 개념을 처음 도입하였다. Goal-Directed Motion이란 예를 들어, 도달하려고 하는 손끝 위치를 주고 어깨나 팔꿈치 관절의 각도를 계산하여 움직임을 표현하는 방식을 의미한다. 사용자가 많은 시행착오 끝에 완성하여야 했던 자연스러운 인체의 운동을 인체 부분의 끝(예, 손끝)의 목표 지점만을 지정하면 어깨, 팔꿈치, 손목등의 형상을 생성할 수 있게 되었다. 그들의 접근 방식은 Kinematics에 기초를 두고 있으며, 힘, 회전력, 균형등은 고려대상이 아니었다. 또한 Goal-Directed Motion을 찾기 위하여 Analytic 해법, 수치적인 방법등을 고려하였다[25]. 이후 Goal-Directed Motion은 Inverse Kinematics로 불리어지고 있다.

Girad와 Maciejewski[14]는 PODA 애니메이션 시스템에서 사용된 관절 모형을 다리의 운동 묘사 측면에서 설명하였다. 다수의 관절이 있는 동물, 기계의 다리 운동을 표현하는데 Key Frame간의 보간법만으로 계산된 관절 각도 (Interpolated Joint Position)는 그림 5에서 발견할 수 있는 문제점이 있다.

즉, 발바닥이 다리 운동 중 땅바닥에 위치하여야 한다는 제한 조건을 충족시키지 못하는 것이다. 따라서 그들은 이 문제점을 해결하기 위해 Kinematics와 Dynamics를 혼합한 모델로 다리운동을 표현하는 방식을 고안하였다[14]. 그 이후 대화식으로 인체

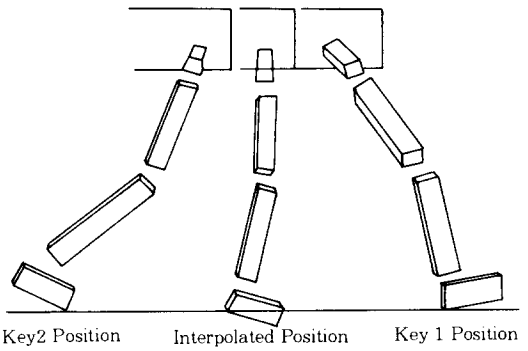


그림 5. 보간 계산으로 얻어진 다리 형상

운동을 표현하는 변수(예, 운동의 속도)들을 제공하는 기능이 확장되었다[13].

1987년 Wilhelms는 종래의 Kinematic 접근 방식이 완성하지 못했던 현실감있는 인체 운동영상을 제작하기 위해서 Dynamic Approach를 사용하였다. Dynamics를 적용하기 위해서 인체의 각 지체에 가해지는 중력을 고려하였고 관절 각도의 한계를 표현하기 위하여 각 관절의 자유도에 스프링과 제동기(Damper)가 있는 것으로 생각하였다. 이들이 작용하여 관절의 각도가 주어진 한계내로 유지되도록 고안하였다. 또한 바닥과 접촉하는 지점에서 생기는 힘을 가정하여 인체 모델로 영상이 바닥속으로 들어가는 상황을 제거하도록 하였다. 다수의 자유도마다 해당되는 Control Information을 부여하기 위해 Virya라는 그래픽 에디터를 사용하였다. 그림 6은 이 시스템으로 만든 인체 모델이 미끄러운 바닥에 넘어지는 영상을 보여주고 있다[52].

인체의 여러 부분에 각각 도달하여야 하는 위치가 주어질 때 인체의 최종 형상을 생성하기 위한 방법을 고려한 POSIT 시스템을 Badler et al. 제안하였다[6]. 예를 들어, 손끝과 무릎이 도달하여야 하는 위치가 주어질 때 두가지 제한 요소를 만족하는지를 파악하고 만족하면 최종 인체 형상을 만들고 그렇지 못하면 손끝이 위치하여야 하

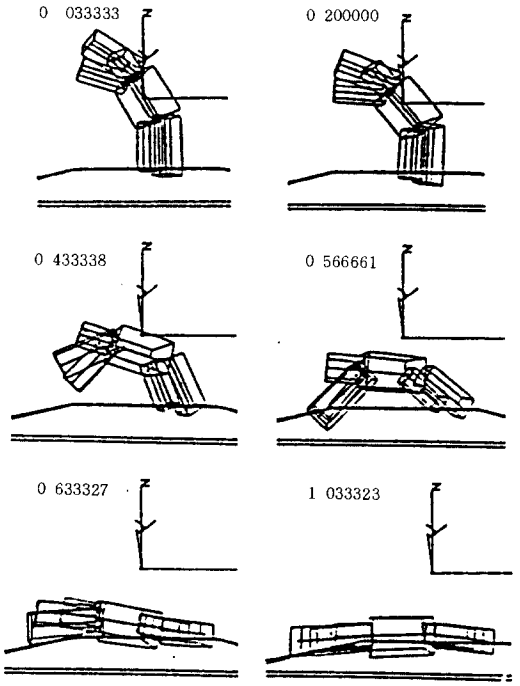


그림 6. 인체가 넘어지는 영상

는 제한 조건과 무릎이 도달하여야 하는 제한 조건의 가중치(사용자가 지정)를 고려하여 가장 바람직한 형상을 보여 주는 방법이다. 이때, 위치시킬려고 하는 지점과 인체 부분사이에는 가상의 스프링이 존재한다고 생각하고 각 가중치를 그 스프링의 탄성계수로 인식하였다. 그림 7과 그림 8은 그들의 방법에 의하여 생성된 영상을 보여주고 있다. 사각형은 목표지점이며, 시각형과 지체사이의 직선은 스프링을 나타낸다.

그림 7에서는 인체 형상이 손끝의 위치와 팔꿈치의 목표지점들을 모두 만족시키지 못하여 그들의 가중치를 최소화하는 위치로 최종상태가 된 것을 보여주고 있다. 그림 8은 인체가 의자에 앉아있는 영상을 만들기 위한 지체와 목표 지점간의 관계를 보여주고 있다.

Armstrong et al.은 Dynamics에 기초한 14개의 지체를 포함한 인체 모델을 표현하

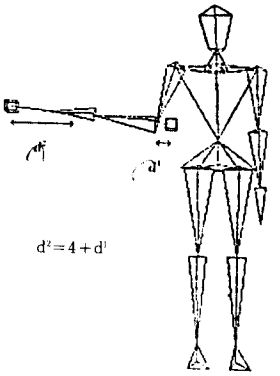


그림 7. 가중치에 의한 위치 결정

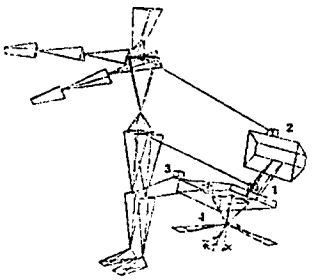


그림 8. 의자에 앉는 동작

였다. Dynamics에서 요구되는 대규모의 계산을 피하기 위하여 한 번에 소수의 지체만을 Control하고 다른 지체들은 움직이는 지체의 움직임에 따라 자연스럽게 움직이도록 설계하였다. 또 그들은 인간의 운동을 Limb Process와 Global Process로 구분하였다. Limb Process는 인체의 움직임에 하나의 지체가 가동하는 Process를 의미하고 Global Process는 인체의 균형을 유지하는 것처럼 다수의 지체가 포함되는 Process를 의미한다. 그들 방법은 애니메이션 생성 중간에 움직이는 인체 모델을 보고 새로운 운동 변수를 부여할 수 있는 특징을 갖고 있다[4].

Hoffmann과 Hopcroft는 일반적인 기하학적인 모델의 운동을 모의 실험하는 시스

템을 고안하여 인체 모델이 의자에서 일어서는 과정의 모의 실험 과정을 보여주었다. 이들의 모델은 Kinematics와 Dynamics를 포함하고 있다[20]. Hahn은 Dynamics를 이용하여 일반적인 강체(Rigid Body)의 운동 영상을 생성하는 방법을 제안하였다. 강체들의 운동에 충돌이 발생하는 지를 그의 시스템에서 확인할 수 있으며 인체 모델의 체조 장면을 그의 시스템으로 재현하여 보았다[17]. 일반적인 강체의 운동을 위한 시스템이므로 간단한 인체 모델(5개의 지체)만을 고려하였다.

Witkin과 Kass는 새로운 Spacetime Constaints라는 개념을 제안하였다. 이 개념은 A지점에서 B지점까지 이동하는데 목적식(Objective Function)을 최소화(예, 최소한의 에너지 소모, 최단 운동 시간등)하면서 이동할 때의 움직임을 표현하는 개념으로 주어져 있는 이동 물체의 물리적인 구조와, 이 물체가 사용할 수 있는 힘, 바닥과의 마찰력등을 동시에 고려하는 방법이다. 즉, 처음의 상황과 마지막 상황을 가르쳐 주고 중간에서 그 물체에게 가해지는 외부적인 요소를 가르쳐 주면 물체는 주어진 목적을 달성하는 운동을 취한다는 것이다. 그들은 Luxo라는 램프(Lamp)를 이용하여 점프 동작을 재현하였다. 운동 과정에서 이루려는 목적식에 따라 물체의 운동은 달라진다고 판단하고 자연스러운 인체 움직임을 재현하기 위해서는 올바른 목적식의 구성이 중요하다고 제안하였다[55]. 그림 9는 램프의 점프 동작의 한 예를 보여 주고 있다. 이 그림에서 마디에는 근육이 있는 것으로 가정하고 도약전의 움츠리는 동작과 착지후 충격을 완화하기 위한 동작을 관찰할 수 있다.

Thalmann부부는 MIRA[31]와 MIRANIM[32]이라는 애니메이션 시스템을 개발하였고 Abstract Muscle Action(AMA)과 Expression Key-Frame Interpolation등 을

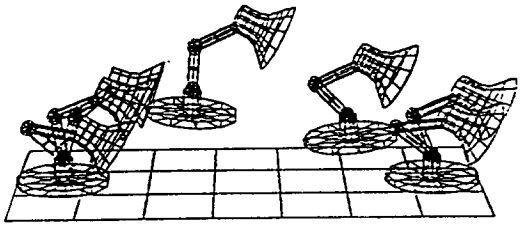


그림 9 : 램프의 도약

포함한 Human Factory 시스템을 이용하여 배우들의 영상을 재현하였다[28].

Lee et al.은 인체가 물체를 들어올리는 과정이 물체의 무게에 따라 변화하는 것을 현실감있게 보여주는 Kinematics와 Dynamics를 함께 고려한 시스템을 고안하였다. 그들은 인간은 주어진 동작을 가능한 한 편한 상태에서 수행하려 한다는 가정을 세우고 인체의 동작을 연구하였다. 인체는 물체의 무게에 따라 순간적인 힘(Jerk)을 사용하거나 새로운 관절을 움직임에 포함시키고 몸을 움츠리는 동작을 취하게 된다. 또한 그들의 시스템은 들어 올리는 물체가 무거울수록 몸쪽에 물체를 가까이 할려고 하고 현재의 신체 자세로는 동작이 불가능한 경우 계획된 물체 이동경로를 완전히 바꾸는 동작이 가능하다[26].

Mirolo와 Pagello는 WM(World Modeler)를 이용하여 인체 모델의 영상을 구성하였다. WM은 일반적인 로보트의 움직임을 표현하려는 시스템으로 각 지체는 실린더로써 표현된다. 로보트와 외부 환경의 위치를 고려하여 로보트의 움직임을 결정할 수 있으며 충돌을 미리 계산할 수 있다[34].

관절이 있는 물체에서 Inverse Kinematics를 적용할 때 선형 시스템 Ax=b를 풀게 된다. 이때 동작에 따라 이 시스템이 Ill-Conditioned 문제가 될 수 있으므로 결과를 올바르게 얻기 위해서는 특별한 고려가 필요하다. 그림 10은 손끝의 작은 위치 변화가 손목, 팔꿈치의 위치를 완전히 바꿀

수 있는 Ill-Conditioned 문제의 한 예를 보여주고 있다.

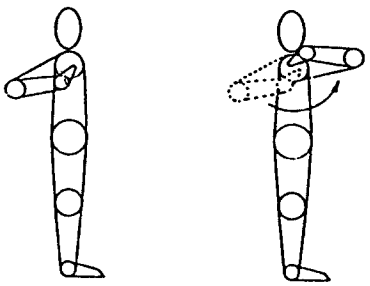


그림 10. Ⅲ-Conditioned 문제의 예

이러한 문제점은 문제를 해결하는 방법에서 발생되는 것이 아니고 문제 형태 자체에서 발생한다고 볼 수 있다. Maciejewski는 Kinematics에서 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Damped Least Squares라는 방법을 제안하였고 이러한 방법을 Dynamic 방법에도 적용하였다[27].

University of Pennsylvania에서 인체 모델의 애니메이션을 위해 개발한 Jack 시스템은 Dynamics를 배제한 Kinematics 모델을 사용하고 있다. Jack은 36개의 관절을 갖고 88개의 자유도를 갖는다. 그들은 체중의 느린 이동, 발의 움직임에 따른 인체의 운동을 표현하는데는 특별히 힘과 회전력을 고려하지 않더라도 현실감 있는 영상을 만들 수 있다고 주장하였다. 신체의 균형을 유지하도록 모델을 만들고 등뼈를 단순히 하나의 지체가 아닌 18개의 관절이 있는 모델로 만들어 인체가 상체를 굽힐 경우 현실감있는 형상을 만들도록 고려하였다[42]. Jack에서 사용되는 Interactive Control [43]에 상세히 설명되어 있다.

로보트의 기동성을 연구하면서 인체의 다리 동작의 연구가 많이 수행되어졌다[45, 7, 50, 33, 40]. 이중 Bruderlin은 KLAW (Keyframe-Less Animation of Walking) 시스템을 개발하였다. 인체의 걸음 걸이를 표현하기 위하여 걸음에 영향을 주는 25개의 변수를 정하고 변수의 변화에 따른 걸음걸이의 달라짐을 확인할 수 있도록 시스템을 구축하였다. Kinematics와 Dynamics의 방법을 동시에 고려하고 있으며 걸음 걸이에 따라서 Pelvis가 움직이는 것을 관찰할 수 있다[7].

Raibert와 Hodgins는 다리의 움직임 속도가 변화하면서 형성되는 동작들인 걷기, 달리기, 점프등을 묘사할 수 있는 시스템을 만들었다. 이 시스템은 인체의 다리 뿐만 아니고 일반적인 다리가 있는 동물, 로보트의 움직임까지도 분석하여 영상을 만들 수 있도록 고안되었다[45].

Ⅲ. 인체의 부분적인 표현 방법

본장에서는 인체의 전체적인 표현보다는 부분적인 표현에 중점을 둔 표현 방법들에 대하여 알아보기로 한다.

3-1. 손의 표현

로보트의 기능이 확장됨에 따라 로보트가 물체를 잡고 위치를 이동시키는 손의 기능을 갖추어야 할 필요성이 대두되었고 물체

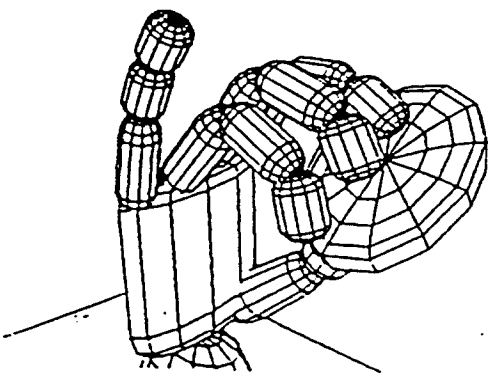


그림 11. 손의 동작

를 잡고 이동시키며 내려놓는 동작을 연구하기 위하여 인체 손의 기능을 파악하는 연구가 진행되었다. 파악된 손의 움직임을 컴퓨터 그래픽으로 묘사하여 비교해 보면서 얼마나 정확히 손의 움직임을 이해했는가를 결정할 수 있게 된다.

손의 특징은 좁은 공간상에 다수의 관절들이 위치하고 있고 또한 관절의 굽힘에 손가락 뼈에 붙어 있는 피부와 근육들이 서로 상호 작용을 한다는데 있다. Rijpkema와 Girad는 엄지 손가락은 5개의 자유도를 갖고 있고 다른 손가락들은 4개의 자유도를 갖는 것으로 가정하여 손의 모델을 만들었다. 손가락의 움직임을 Kinematics로 표현하였고 손가락들과 각 손가락의 관절들이 완전히 독립적이지는 않다는 사실로 부터 손가락 움직임을 표현하는 방법을 고안하였다. 또한 손가락 움직임으로 부터 물체를 쥘 수 있는 동작이 될 수 있도록 지식 기반 시스템 모델을 만들었다. 그림 11은 이 시스템으로 형성된 손의 동작을 보여 주고 있다[46].

Gourret et al.은 공학에서 구조 해석에 사용되는 유한 요소 방법(Finite Element Method)를 사용하여 손가락의 움직임을 분석하여 영상을 만들었다. 뼈의 모습보다는 손가락이 굽어질 때 피부의 변형 모습을 중심으로 해석한 방법으로 굽는 위치의 피부간의 상호관계와 살의 탄력적인 물리적 성질을 고려하였다. 손이 공을 잡는 모습등의 재현에 효과적이다. 그림 12는 손가락의 굽히는 과정을 보여 주고 있다[16].

이외에 손의 움직임을 분석한 연구는 [49], [10], [48]등에서 발견할 수 있다.

3-2. 얼 굴

인체 얼굴의 애니메이션은 만화, 상업광고, 범인 인상 재구성등의 여러 응용분야에 사용되고 있다. 인체의 얼굴은 개인의 감정을 정확히 표현하는 수단으로 다수의 근육으로 그 표정이 생성된다. 얼굴을 재구성하는데 필요한 변수로는 형태(Conformation) 변수와 표현(Expression) 변수가 있다. 형태 변수는 턱의 길이, 이마 형태, 눈동자 크기, 코의 길이, 눈과 눈 사이 길이 등으로 개인마다 다른 형태를 나타내는 변수이고 표현 변수는 감정을 나타낼 때 달라지는 표정을 결정하는데 사용되는 변수이며 중요한 표현 변수는 눈과 입에 연관된 변수들이다. 눈을 뜨는 동작의 대소, 눈썹의 형태, 눈동자가 바라보는 방향, 입의 크기, 입술의 위치, 입 가장자리의 방향등이 중요한

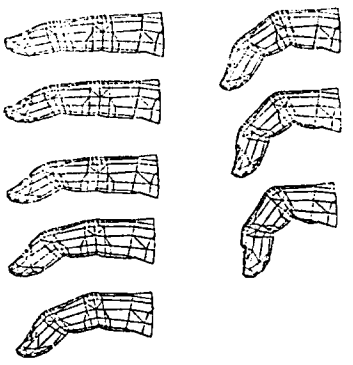


그림 12. 손가락의 굽힘

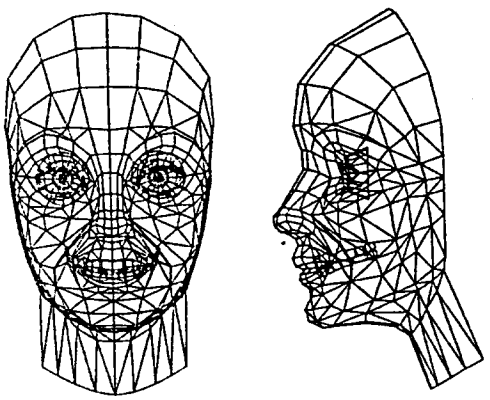


그림 13. 얼굴의 형상

표현 변수들의 예이다. 그러나 아직까지 표정을 결정하는 변수들의 정확한 정의는 이루어지지 않았다. Parke는 이러한 변수들을 변화시키면서 얼굴을 다각형의 집합체로 표현하여 표정을 생성하였다. 변수들의 값을 적절히 변화시키면서 웃는 모습, 놀라는 모습등을 생성할 있다. 그림 13은 한 예를 보여 주고 있다[41].

Waters는 Parke의 모델을 어떠한 얼굴 topology에도 사용할 수 있도록 확장시켰다[51].

3-3. 등뼈(Spine)

인체의 등뼈는 전체 33개의 Vertebra로 구성되어 있으며 실제 몸통의 움직임에 관여하는 것은 17개의 Vertebra와 18개의 관절들이다. 각 관절은 하나가 6개의 자유도를 포함하고 있으며[15], 다수의 관절이 모여서 인체의 다양한 몸통 움직임을 표현할 수 있는 것이다.

많은 인체 모델들은 강체 모델을 채택하면서 모델의 단순화를 위해 등뼈를 소수의 지체로 간주하여 모델을 생성하고 있다. 그 모델로부터 얻어지는 운동은 실제와는 다른 부드럽지 못한 모습이 되는 것은 당연하다. 애니메이션의 처리 속도가 빨라지면서 이제는 과거에는 커다란 장애로 작용하던 많은 수의 관절 표현이 점차 가능해 지고 있다. Monheit와 Badler는 Kinematics를 이용하여 몸통의 굽힘을 등뼈 관절 하나 하나의 움직임으로 표현하여 부드러운 인체 동작을 얻을 수 있었다[30]. 개발된 등뼈의 동작을 그들의 Jack시스템에 포함하여 시스템을 구축하였다.

Ⅳ. 결 론

이상에서 우리는 인체의 형상을 컴퓨터 그래픽스를 이용하여 표현하는 시도는 인간-기계 인터페이스 시스템의 구축, 만화 제작, 운동의 모의 실험, 의학등에서 다방면으로 응용되고 있는 것을 알았다. 초창기의 정지된 화상으로 표현되던 단순한 인체 모델에서 현재에는 Kinematics와 Dynamics를 동시에 고려한 애니메이션으로 표현되어 실감나는 인체의 움직임을 보여 주는 것으로 발전하였음을 알 수 있다. 또한 인체의 모든 관절 모양을 하나 하나 사용자가 지정하여야 하던 시스템은 점차 사용자가 '앞으로 걸어가시오', '물체를 어느 정도 들어 올리시오'라는 등의 High Level 명령어을 사용하여 인체의 동작을 표현할 수 있는 단계로 개발되고 있음을 알 수 있다[53]. 컴퓨터 하드웨어의 발전과 함께 인체의 더욱 실감나고 더욱 정교한 움직임을 표현하려는 노력이 기울여 질 것이며 로보틱스의 응용을 목적으로 생체역학과 함께 인체 운동의 본질적인 규칙을 찾으려는 연구가 더욱 진전되리라 생각한다.

본 논문은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 연구되어진 인체의 표현 방법에 중심을 두고 있으므로 컴퓨터 그래픽스 분야에서 중요하게 다루어지고 있는 곡선의 표현, 면의 표현, 3차원 공간 표현등의 문제점등은 포함하고 있지 않다. [3], [21]등에 이 분야에 대하여 좀 더 포괄적인 정보가 서술되어 있고 컴퓨터 애니메이션에 관한 자료들의 색인은 [29]에서 발견할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 정의승, "생체 역학 전문 모형의 개발", 포항공과대학 보고서 POSTECH P90025, 1991.

[2] Amirouche, F. M. L., Ider, S. K., and Trimble, J., "Analytical Method for the Analysis and Simulation of Human Locomotion", *J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 112, pp.

379-386, Nov. 1990.

[3] Angle, E., *Computer Graphics*, Addison Wesley, 1990.

[4] Armstrong, W.W., Green, M., and Lake, R., "Near-Real-Time Control of Human Figure Models", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 7, No. 6, pp. 52-61, June 1987.

[5] Badler, N. I., O'Rourke, J., and Toltzis, H., "A Spherical Representation of of a Human Body for Visualizing Movement", *Proc. IEEE*, Vol. 67, No. 10, pp. 1397-1403, 1979.

[6] Badler, N. I., Manoochehri, K. H., and Waters, G., "Articulated Figure Positioning by Multiple Constraints", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol, 7, No. 6, pp. 28-38, June 1987.

[7] Bruderlin, A. and Calvert, T. W., "Goal Directed, Dynamic Animation of Human Walking", *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 233-242, July 1989.

[8] Calvert, T. W., Chapman, J., and Patla, A., "Aspects of the Kinematic Simulationof Human Movement", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2. No. 9, pp. 41-50, Nov. 1982.

[9] Case, K., Bonney, M. C., and Porter, J. M., "Computer Graphics Standards for Man Modeling", *Computer Aided Design*, Vol. 23, No. 4, pp. 257-268, May 1991.

[10] Cutkosky, M. R., "On Grasp Choice, Grap Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 3, pp. 269-279, June 1989.

[11] Dooley, M., "Anthropometric Modeling Programs - A Survery", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 17-25, Nov. 1982.

[12] Fetter, W. A., "A Progression of Human Figures Simulated by Computer Graphics", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 9-13, Nov. 1982.

[13] Girad, M., "Interactive Design of 3-D Computer-Animated Legged Animal Motion", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 7, No. 6, pp. 39-51, June 1987.

[14] Girad, M. and Maciejewski, A. A., "Computational Modelling for the Computer Animation of Legged Figures", *ACM SigGraph*, Vol. 19, No. 3, pp. 263-269, 1985.

[15] Goel, V. K., "Three-Dimensional Motion Behavior of the Human Spine-A Question of Terminology", *J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 109, pp. 353-355, Nov. 1987.

[16] Gourret, J.-p., Magnenat-Thalmann, N., and D. Thalmann, "Simulation of Object and Human Skin Deformations in a Grasping Task", *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 21-30, July 1989.

[17] Hahn, J. K., "Realistic Animation of Rigid Bodies", *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 299-308, Aug. 1988.

[18] Herbison-Evans, D., "Real-Time Animation of Human Figure Drawings with Hidden Lines Omitted", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 27-33,

Nov. 1982.

[19] Herbison-Evans, D., "NUDES 2 : A Numeric Utility Displaying Ellipsoid Solids", *Computer Graphics*, Vol. 12, No. 3, pp. 354-356, Aug. 1978.

[20] Hoffmann, C. M. and Hopcroft, J. E., "Simulation of Physical Systems from Geometric Models", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 3, pp. 194-206, June 1987.

[21] Johnson, N., *Advanced Graphics in C : Programming and Techniques*, MaGraw-Hill, 1987.

[22] Karwowski, W., Genaidy, A. M., and Asfour, S. S., *Computer Aided Ergonomics*, Taylor, Francis, 1990.

[23] Kingsley, E. C., Schofield, N. A., and Case, K., "SAMMIE-A Computer Aid for Man Machine Modelling", *Coputer Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp. 163-169, Aug. 1981.

[24] Kinzel, G. L. and Gutkowski, L. J., "Joint Models, Degrees of Freedom, and Anatomical Motion Measurement", *J. of Biomechanical Engineering*, Vol. 105, pp. 55-62, Feb. 1983.

[25] Korein, J. U. and Badler, N. I., "Techniques for Generating the Goal - Directed Motion of Articulated Structures", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.2, No. 9, pp. 71-81, Nov. 1982.

[26] Lee, P., Wei, S., Zhao, J., and Badler, N. I., "Strength Guided Motion", *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 253-262, Aug. 1990.

[27] Maciejewski, A. A., "Dealing with the Ill-Conditioned Equations of Motion for Articulated Figures", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 10, No. 3, pp. 63-71, 1990.

[28] Magnenat - Thalmann, N. and Thalmann, Dl, "The Direction of Synthetic Actors in the Film Rendez-vous a Montreal", *IEEE computer Graphics and Applications*, Vol. 6, pp. 9-19, Dec. 1987.

[29] Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D., "An Idexed Bibliography on Computer Animation", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 5, No. 6, pp. 76-86, July 1985.

[30] Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D., *Computer Animation : Theory and Practice*, Springer-Verlang, Tokyo, 1985.

[31] Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, d., "The Use of High-Level 3-D Graphical Types in the Mira Animation System", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 3, pp. 9-16, Dec. 1983.

[32] Magnenat-Thalmann, N., Thalmann, D., and Fortin, M., "Miranim : An Extensible Director-Oriented System for the Animation of Realistic Images", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 5, pp.61-73, Mar. 1985.

[33] McKenna, M. and Zeltzer, D., "Dynamic Simulation of Autonomous Legged Locomotion", *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 29-38, Aug. 1990.

[34] Mirolo, C. and Pagello, E., "A Solid Modeling System for Robot Action Planning", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 9, No. 1, pp.

55-69, Jan. 1989.

[35] Monheit, G. and Badler, N. I., "A Kinematic Model of the Human Spine and Torso", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 29-37, March 1991.

[36] NRC Series, *Human Factors-Ergonomic Models of Anthropometry, Human Bionechanics, and operator Equipment Interface*, National Academy Press, 1984.

[37] O'Donnell, T. J. and Olson, A. J., "GRAMPS-A Graphical Language Interpreter for Real-Time, Interactive, Three-Dimensional Picture Editing and Animation", *Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp. 133-142, Aug. 1981.

[38] Okey, R. E., Suffel, C., and Blount G. N., "Initial Work on a System-Independent Computer Model of a 3D Anthropomorphic Dummy", *Computer-Aided Design*, Vol. 21, No. 6, pp. 393-403, July/August 1989.

[39] Onyshko, S. and Winter, D. A., "A Mathematical Model for The Dynamics of Human Locomotion", *J. biomechanics*, Vol. 13, No. 4, pp. 361-368, 1980.

[40] Pandy, M. G., "A Numerical Method for Simulating the Dynamics of Human Walking", *J. Biomechanics*, Vol. 21, No. 12, pp. 1043-1051, 1988.

[41] Parke, F. I., "Parameterized Models for Facial Animation", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 61-68, Nov. 1982.

[42] Phillips, C. B. and Badler, N. I., "Interactive Behaviors for Bipedal Articulated Figures", *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 359-362, July 1991.

[43] Phillips, C. B., Zhao, J., and Bader, N. I., "Interactive Real-Time Articulated Figure Manipulation Using Multiple Kinematic Constraints", *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 2, pp. 245-250, 1990.

[44] Porter, J. M., Case, K., and Bonny, M. C., *Computer Workspace Modelling*, Taylor, Francis, pp. 472-499.

[45] Raibert, M. H. and Hodgins, J. K., "Animation of Dynamic Legged Locomotion", *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 349-358, July 1991.

[46] Rijpkema, H. and Girad, M., "Computer Animation of Knowledge Based Human Grasping" *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, pp. 339-348, July 1991.

[47] Singh, A., Beatty, J. C., Booth, K. S., and Ryman, R., "A Graphics Editor for Benesh Movement Notation", *Computer Graphics*, Vol. 17, No. 3, pp. 51-62, July 1983.

[48] Terzopoulos, D., Platt, J., Barr, A., and Fleischer, K., "Elastically Deformable Models", *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 205-214, July 1987.

[49] Thompson, D. E. and Giurintano, D. J., "A Kinematic Model of The Flexor Tendons of the Hand", *J. Biomechanics*, Vol. 22, No. 4, pp. 327-334, 1989.

[50] Waldron, K. J., "Force and Motion Management in Legged Locomotion", *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 4, pp. 214-

220, Dec. 1986.

[51] Waters, K., "A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression", *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 17-34, July 1987.

[52] Wilhelms, J., "Using Dynamic Analysis for Realistic Animation of Articulated Bodies", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 7, No. 6, pp. 12-27, June 1987.

[53] Wihelms, J., "Towards Automatic Motion Control", *IEEE computer Graphics and Applications*, Vol. 7, No. 4, pp. 11-22, April 1987.

[54] Willmert, K. D., "Visualizing Human Body Motion Simulations", *IEEE Compurt Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 35-38, Nov. 1982.

[55] Within, A. and Kass, M., "Spacetime Comstraints", *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 159-168, Aug. 1988.

[56] Zeltzer, D., "Motor Control Techniques for Figure Animation", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 9, pp. 53-59, Nov. 1982.