한국 *CAD/CAM* 학회 논문집
제 *12*권 제 *6*호 *2007*년 *12*월 *pp. 429-440*

학술논문

인간 친화적 설계 시스템을 위한 디지털 인체 모델 구성 연구

정문기*, 이건우**, 조현덕***, 김태우****, Ma Yanzhao***, 이상헌*****

Digital Human Modeling for Human-centered CAD System

Moonki Jung*, Kunwoo Lee**, Hyundeok Cho***, Taewoo Kim****,
Ma Yanzhao*** and Sanghun Lee*****

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop the Human-centered CAD system in which human factors can be considered during the design stage. For this system there are several issues to research, like the digital human modeling technology, the definition of interactions between human and product, the simulation of human motion when using the product, and the bio-mechanical analysis of human, etc. This paper introduces how to construct the kinematical structure of the digital human model. For our digital human model H-ANIM, the international specification of humanoid animation is referenced. And we added the skeleton geometry and the skin surfaces to our model. And it can manipulate its joints by forward kinematics. Also the IKAN inverse kinematics algorithm is adopted to support the posture prediction of the digital human model in the product environment. All of these ideas are implemented using CAD API so that we can apply these functions to the current commercial CAD systems. In this manner, the human factor issues can be effectively taken into account at the early design phase and the costs of bio-mechanical evaluation will be significantly reduced.

Key words : Digital Human Model, Human-centered CAD, Ergonomics

1. 서 론

기존의 제품 설계 프로세스에서는 인체와 제품의 상호작용을 고려하기 위하여 시제품과 인체모형(dummy) 또는 사람을 이용한 실험적 평가를 수행하고 그 결과를 설계에 반영한다. 이와 같은 실험적 또는 시행착오 법에 의한 제품개발 방법은 상당한 개발비용과 개발기간을 필요로 하고 제품의 인체 조화성을 정량적으로 평가하여 설계에 반영하기에 적합하지 않다. 이는 제품 설계에서 이용하는 대부분의 CAD/CAE 시스템이 제품의 모델링이나 시뮬레이션만을 지원하고 인체 모델에 대한 고려가 부족하기 때문이다.

*교신저자, 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
**종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
***서울대학교 기계항공공학부
****학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
*****종신회원, 국민대학교 기계자동차공학부
- 논문투고일: 2007. 04. 11
- 심사완료일: 2007. 09. 07

이러한 제품 설계 프로세스에서의 인체 고려 요소의 부족은 인체와의 상호 작용이 중요한 많은 제품에 있어서 개발 기간의 연장, 개발비용 상승, 제품에 대한 소비자의 불만족, 제품 출시 이후 리콜 등의 문제점의 원인으로 이어진다. 또한 기술 발전으로 인한 제품의 기본 품질의 평준화에 따라 소비자의 요구가 점차 제품의 기본 기능에 대한 부분에서 사용자 친화적인 부분으로 변화하고 있다. 따라서 앞으로는 기존의 제품 중심 설계에서 벗어나 사용자 친화적인 제품 개발을 위한 새로운 인간중심 제품개발 설계방법이 필요하다.

이러한 새로운 인간공학적 설계를 지원하는 인체-제품 통합 설계 시스템을 구축하기 위해서 정밀한 디지털 인체 모델, 디지털 인체 모델과 디지털 제품 모델과의 상호 작용의 시뮬레이션을 위한 통합 모델링과 상호 작용의 수학적 모델링, 설계 변경을 위한 시뮬레이션 결과의 정량적 평가 방법 등 다양한 주제의 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 초기 제품 설계에서 이용하는 CAD

시스템에서 인체 모델과 제품 모델을 연동하여 설계하고, 인체 모델과 제품 모델간의 상호 작용을 수학적으로 모델링 하여 인간 공학적 설계를 지원하는 기술과 시뮬레이션과 CAD 시스템의 유기적 연계 기술에 관한 연구를 수행하였다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 디지털 인체 모델을 이용한 연구

디지털 인체 모델은 많은 산업 분야의 설계 및 개발 프로세스 상에서 필수적인 부분이 되고 있다. 점점 더 많은 조직과 기관에서 디지털 인체 모델 기술을 사용함에 따라, 이 기술은 증대되는 산업계의 요구를 충족시키기 위해 진화하고 있다. 과거에 단순히 인체의 형상과 크기에 관련한 연구를 위해서 사용되던 디지털 인체 모델 기술을 오늘날에는 자동차, 항공기, 우주선 및 심지어 의류 산업에 이르기까지 제품설계 및 생산에 적용하려는 시도가 늘어나고 있다.

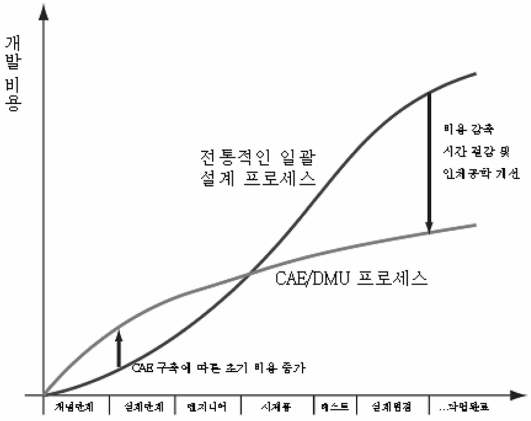


Fig. 1. 전형적인 제품/프로세스 개발 추세.

Fig. 1의 그래프를 보면 디지털 휴먼 모델을 이용한 CAE/DMU 프로세스는 기존의 전통적인 일괄 설계 프로세스에 비해서 제품 개발 프로세스 후반으로 갈수록 현격한 비용감축 효과와 시간 절감 및 인체공학적 요소에 대한 개선을 이뤄낼 수 있는 장점을 갖고 있다[1].

따라서 효율적인 인간공학적 설계를 위해서는 기존의 제품 설계를 위한 CAD/CAE 시스템과 인체 모델 시뮬레이션 도구간의 효과적인 연계가 필수적임에도 불구하고 기존의 디지털 인체 모델에 대한 연구의 대부분은 의학, 재활, 충돌상해, 부상 해석 등 특정한 분야의 적용을 목적으로 한 것이 대부분이며, 자동차와 같은 일반 소비자 제품의 개발과 관련한 디지털 인체 모델을 제공하는 대부분의 CAD/CAE 시스템들 역시 인체 모델 생성 및 동적 시뮬레이션을 지원하지 않고 있어 인체 모델 연구와 CAD/CAE 시스템 모두 제품 설계 관점에서 기구 또는 기계와 인간과의 상호작용을 동시에 설계 및 시뮬레이션할 수 있는 기능이 미비한 상황이다.

2.1.1 의료/스포츠 분야의 디지털 인체 모델

의학이나 스포츠 분야의 생체공학적 해석을 위한 인체 모델의 경우는, 미국 Biomechanics Research Group Inc.[2]에 근골격 모델에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 유수의 세계적 기업 및 미국 국가기관을 고객으로 두고 있다. 의료장비, 의학(정형외과), 스포츠, 재활, 작업 환경 시뮬레이션 등 사람의 움직임과 관련된 다양한 분야에 걸쳐 연구가 이루어지고 있다. 단순한 타원형태의 인체모델에서부터 근골격 모델까지 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 이 회사에서 제작한 인체 모델을 위한 모듈인 LifeModeler의 경우 고가의 상용소프트웨어인 ADAMS[3]의 플러그인 생체역학 모듈로 동역학 해석의 부분은 자체 개발이 아닌 ADAMS의 그것을 이용하고 있다. 따라서 제품 개발 시 통합된 환경에서 인체와 제품을 동시에 시뮬레이션하면서 설계를 수행하기에는 어려움이 있다.

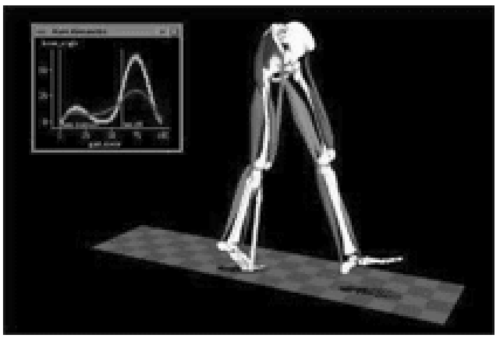


Fig. 2. SIMM을 이용한 보행동작 분석.

마찬가지로 생체역학적 해석을 위한 인체 모델의 하나로, 미국 Musculographics, Inc.[4]에서 근골격 모델에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며 생체역학 시뮬레이터 SIMM과 Dynamics Pipeline을 개발하였다. 동역학 해석 모듈로는 별도의 SD/FAST[5]라는 소프트웨어를 사용한다. Biomechanics Research Group, Inc. 사에 비하여 인간의 거동을 측정하기 위한 모션 캡쳐 하드웨어와의 연동, 근골격계 모델의 정밀함, 동역학적 데이터를 이용한 인간 이외의 다양한

생명체에의 적용에 있어서 더 뛰어난 기능을 제공하고 있어 스포츠, 의료 3D 애니메이션 등의 관련 분야에서 사용되고 있다. 그러나 제품과 인간의 상호 작용에 대한 고려가 부족하여 인간 거동에만 초점이 맞춰져 있어 뛰어난 인체 모델을 지원하고 있음에도 제품 개발 단계에서 인간 공학적 설계에 이용하기에는 어려운 상황이다.

2.1.2 자동차 산업의 디지털 인체 모델

자동차 산업에서 인체 모델을 이용한 연구들을 살펴보면, 독일에서 1987년 독일 자동차 생산 협회 주도로 Munich 대학과 연계하여 자동차 내장 초기 설계 단계에서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용 인체의 영향을 평가하고 안락감을 테스트하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 통해 RAMSIS를 개발하고 Human Solution[6] 회사를 설립하여 자동차 내장 설계에서 안락함 시뮬레이션 도구로서 독자적인 위치를 확보하여 현재 세계 자동차 회사의 70% 이상이 사용하는 성과를 이루었다. 그리고 최근 자동차 설계에서 가장 많이 사용되는 CATIA V5의 모듈로서 동작하는 버전을 개발하여 사용 편의성도 증가하였다.

이와 유사한 연구로서 캐나다의 Genicom Consultants Ltd.사의 SAFEWORK[7]과 미국의 펜실베니아 대학에서 NASA의 지원으로 시작한 Jack[8]이 있으며 자동차 내장 설계의 경우 해석의 정확성과 기능 제공에서 RAMSIS에 비해 상대적으로 부족한 성능을 보인다. Jack의 경우 보다 범용적인 인체 시뮬레이션 도구로서 대표적인 CAD 소프트웨어 업체인 UGS의 지원을 받아 UG 내에서 공장에서의 작업자 시뮬레이션, 자동차 설계를 위한 모듈로서 제공되고 있다.

Fig. 3. CATIA의 디지털 휴먼 모델.

다른 CAD 소프트웨어에서 인체 모델을 지원하는 경우로 CATIA V5[9]를 들 수 있다. 여기서는 자체 디지털 인체 모델을 지원하고 가상 환경에서의 인간과 제품의 움직임을 분석하여 인간의 안락함과 제품의 안전 성능 향상, 인간의 자세 제어를 통한 제품 조작 테스트 등의 기능을 제공하여 제품 개발 초기 단계에서 인간 공학적 설계를 지원한다. CATIA에서 지원하는 기능은 근본적으로 제품 사용 시 인체 자세에 관한 평가를 이미 구축해 놓은 근거 규정에 의해 수행하는 것이며 인체 자세 계산이 부정확하고 수동 작업이 많이 요구되어 설계 작업에 이용하기에는 부족한 부분이 많다.

위에서 서술한 RAMSIS, SAFEWORK, Jack, CATIA에서 사용되는 인체 모델의 경우 인체 해석에 대한 고려가 인체 자세에 대한 시뮬레이션을 위주로 되어 있고 주로 정역학적 해석만을 고려하고 있다. 따라서 제공하는 인체 모델은 인체의 동작을 근사화하기 위한 관절 생성과 체형의 차이를 적용하기 위한 외형의 표현에만 국한되어 있다. 따라서 인체의 물성치나 근육에 대한 고려가 없어 역학적 해석에 이용하기 어렵다. 그리고 인체의 자세에 대한 해석도 관절의 움직임 범위에 기반을 둔 도달 가능성, 간섭의 해석, 특정 자세에서의 각 관절 각도에 따른 편안도 측정 정도에만 그치고 있어, 자동차 편의성 부분에서 근골격계를 고려한 인체 동작에 대한 정확한 해석을 수행할 수 없는 단점이 있다.

3. 디지털 인체모델링

3.1 디지털 인체 모델링 기술

디지털 인체 모델링 및 Human-centered CAD 시스템을 구축하기 위해서는 인체 모델링 기술, 인간과 제품간의 상호 작용에 대한 정의, 인체 동작 시뮬레이션 기술, 인체의 생체역학적 해석 기술 등이 필요하다. 본 논문에서는 H-ANIM[10]이라는 인체 모델링의 추상적 계층구조를 이용하여 디지털 인체 모델링의 구조를 생성하였고, 각 링크 사이의 조인트의 회전을 쿼터니온으로 나타내었으며, 여기에 골격의 기하형상 정보를 정렬시키고, 역기구학 자세제어 알고리즘을 통하여 팔과 다리의 조인트에 대한 회전각을 생성하였다.

3.1.1 H-ANIM 1.1 인체 표준 규격

인체 해부 구조를 반영하는 생체역학적 모델을 구성하기 위해서 기존의 관련 연구자들은 조인트-링크 규약을 사용해왔다. 이러한 가정을 토대로 인체는 조인트들에 의해 연결된 뼈(링크)들의 집합으로 구성될 수 있다.

보통의 인체의 경우 206개의 뼈를 가지고 있고 수많은 티슈 조직 및 장기들이 뼈에 붙어 있다. 따라서 이를 모두 정확히 반영하는 인체모델을 구성하는 것은 상당히 복잡한 일이다. 인체를 더 많은 자유도를 가지는 모델로 구성할수록, 인체 모델에 대한 정확도는 향상되는 대신에 문제의 복잡성도 같이 증가하므로 생체역학적 문제를 풀기가 더욱 더 어렵게 된다. 따라서 적당한 수의 자유도를 가지는 단순화된 모델로 구성할 필요가 있다. 따라서 많은 기존의 관련 연구자들은 그들이 해결하고자 하는 문제의 복잡도 및 응용분야에 따라서 수많은 종류의 인체 모델을 제안해왔다.

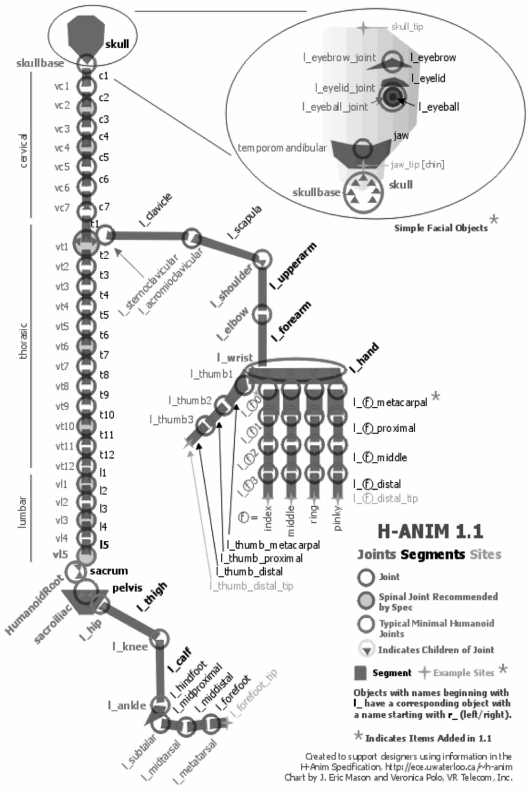


Fig. 4. H-ANIM 1.1 인체 표준 규격.

국제표준 ISO/IEC 19774는 Information technology-Computer graphics and image processing-Humanoid animation(H-Anim)이라는 제목의 단일표준으로 구성되어 있다. 이 국제표준은 3차원 인간 모델링을 위한 추상적 표현의 H-Anim을 정의하고 있다. 이 국제표준은 휴머노이드를 표현하는 표준적인 방법을 제시하는데, 예를 들면 A라는 회사에서 만든 모션 캡쳐 시스템에서의 모션 캡쳐 데이터를 가지고 B라는 회사에서 만든 애니메이션을 위한 소프트웨어에서 별도의 데이터 변환 없이 바로 애니메이션을 구동할 수 있게 하는 것을 가능케 한다.

본 연구에서 사용한 인체 모델의 기본 구조는 ISO/IEC 19774, H-Anim에 기반을 두되 약간의 변경사항이 있는 인체 모델을 사용하였다(Fig. 4, Fig. 6 참조). 모델의 세부도는 'Level of Articulation One'을 선택하였는데 이유는 'Level of Articulation Two' 나 'Level of Articulation Three'의 경우 손과 발 세그먼트에 대해 필요 이상으로 자세한 구조를 가지고 있기 때문이다. 본 연구에서 사용된 인체 모델의 경우 Pelvis에 루트 노드가 있고, 다른 링크들은 계층적인 구조로 연결되어 있다. 링크들 사이에는 조인트 노드들이 있고, 각각의 조인트 노드는 각각 자신의 부모 노드와의 상대적인 운동에 따라 다른 수의 자유도를 가지고 있다.

3.1.2 조인트 규약 및 골격 형상 정보

조인트는 두 개의 링크 사이의 상대적인 운동을 표현한다. 기구학적인 용어로, 우리는 상대적인 운동을

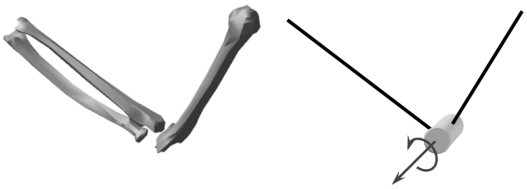


Fig. 5. 팔꿈치를 1자유도의 조인트로 표현.

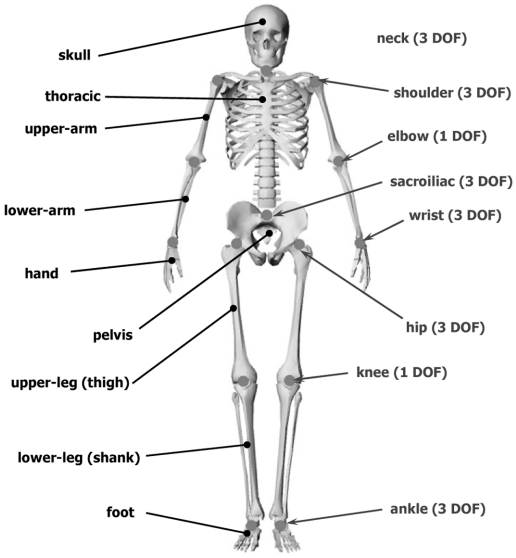


Fig. 6. 인체 모델에서의 세그먼트와 조인트.

특정한 수의 DOF(Degree of Freedom, 자유도)로 상대적인 운동을 표현한다.

팔꿈치 조인트에 대해서는, 팔꿈치 조인트를 따라서 단지 1자유도의 회전 운동만 가능하다고 간주할 수 있기 때문에 Fig. 5와 같이 간주될 수 있다.

손목 조인트와 같이 좀 더 복잡한 조인트의 경우는 3자유도의 회전 운동이 가능한 구형(spherical) 조인트로 간주할 수 있다. 그러나 어깨 조인트와 같은 경우는 인간의 신체를 구성하는 조인트들 중 가장 복잡하므로 경우에 따라서는 좀 더 많은 고려가 필요하다.

본 연구에서는, 다음 그림과 같이 인체를 구성하였다. 전체적으로 40자유도를 가지는 모델이 사용되었고, 어깨 부분의 자유도는 3자유도의 구형 조인트로 모델링 하여서 역기구학이나 동역학 시뮬레이션을 수행할 경우 계산을 용이하게 할 수 있도록 하였다.

3.1.3 인체 자세 제어를 위한 역기구학

본 연구에서는 인체의 팔과 다리에 대한 역기구학 문제의 해결을 위해 공개 라이브러리인 IKAN 역기구학 알고리즘을 이용하였다[11]. 이 알고리즘은 해석적인 방법 및 수치연산방법을 이용해서 목표, 방향, 및 목적 조건에 따른 역기구학 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서는 인체의 두 팔과 두 다리를 각각 분리하여 각각에 대해서 독립적으로 역기구학 문제를 적용시켜 해결하도록 구성하였다. 만약 사용자가 왼손의 위치와 방향을 바꾸었을 경우 역기구학 문제는 왼팔에만 적용된다.

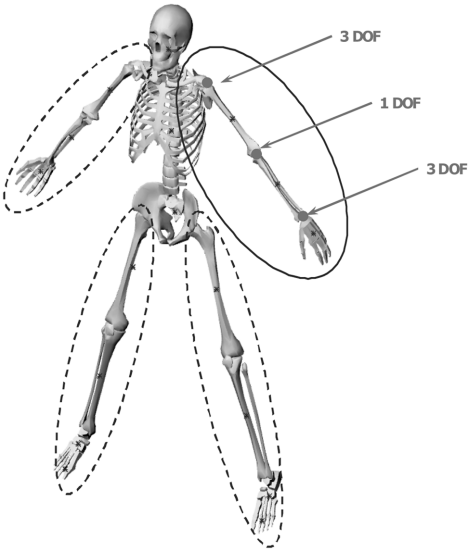


Fig. 7. 4개의 독립적인 역기구학 세그먼트.

7자유도 링크로 팔 구성하였을 때, 팔은 3개의 링크와 3개의 관절로 구성된다. 어깨 관절(S1)과 손목 관절(S2)은 3자유도의 조인트(spherical)이며 팔꿈치(R) 부분은 1자유도의 조인트(revolute joint)로 구성되어 총 7자유도를 갖는다(Fig. 5 참조). 여기에서 목표위치는 손목에 위치하는 좌표계의 원점이 되므로 주어진 목표 위치는 손목을 제외한 4자유도계 시스템의 역기구학 해를 구하는 문제가 된다. 4개의 관절각도는 어깨관절의 x축부터 다음과 같이 $\theta_1 \sim \theta_4$으로 주어지고, 초기자세에서의 각도를 0으로 하여 $\theta_1 \sim \theta_4$의 관절 각도에 제한을 고려할 수 있다.

Table 1. 자세제어를 위한 회전 관절 각도

위치	관절 각	회전축	제한 범위
어깨	θ_1	x축(바깥)	$0 \sim \pi$
	θ_2	y축(앞)	$0 \sim -\pi$
	θ_3	z축(위)	$0 \sim \pi$
팔꿈치	θ_4	x축(바깥)	$0 \sim \pi$

어깨와 팔꿈치에서의 관절 각도($\theta_1 \sim \theta_4$) 값을 순차적으로 설정해줌으로써 목표위치로 손목을 위치시키는 것이 가능하다. 먼저 초기 자세에 있던 팔은 팔꿈치 좌표계의 축에 대해 θ_4 회전한다. 그리고 어깨의 3자유도 관절에서 x와 y축에 대해 각각 θ_1과 θ_2만큼 회전하여 팔꿈치의 위치를 맞춘 후 마지막으로 원하는 목표지점(Target)으로 가기 위해 어깨 관절의 축에 대해 만큼 회전하여 손목을 목표 위치로 이동시킨다. 마지막으로 손목의 3자유도 좌표계는 목표지점에서의 자세에 따라 결정된다. 이 과정을 그림으로 나타내면 다음과 같다(Fig. 9 참조).

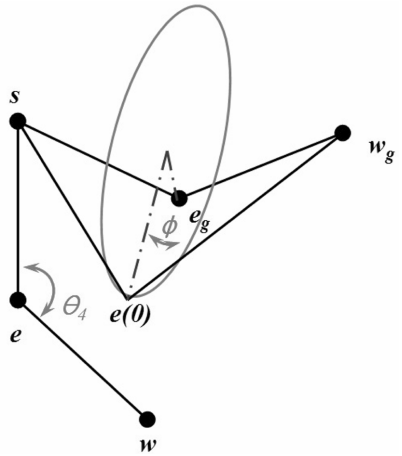


Fig. 8. 회전행렬 계산.

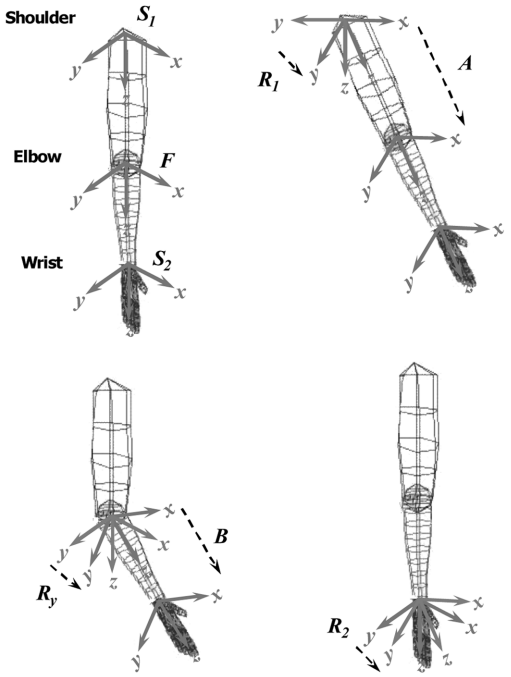


Fig. 9. 도달 자세까지 움직임 발생 순서.

4. 통합 시스템 구현

4.1 상용CAD 시스템과의 통합

본 논문에서 구성한 디지털 인체 모델과 역기구학 알고리즘은 상용 CAD 시스템인 SolidWorks의 API를 이용하여 설계 시스템 내에 통합되었다. SolidWorks 내에 Add-in 모듈의 형태로 휴먼 모듈을 생성하고, 이를 이용하여 제품 개발 환경 내에 디지털 인체 모델을 생성할 수 있으며, 또한 역기구학을 이용하여 인체 모델의 자세제어를 통해 제품과 인체의 상호 작용을 고려할 수 있다.

4.1.1 SolidWorks API를 이용한 휴먼 모듈 생성

디지털 휴먼 모듈과 CAD시스템은 API를 통해서 정보를 교환한다. 디지털 휴먼 모듈은 CAD시스템의 add-on 프로그램처럼 작동하게 되므로 새로운 설계 시스템이 기존의 설계 환경에 완전히 통합될 수 있다.

디지털 휴먼 모듈에는 크게 두 가지가 있는데, 하나는 'Human-Model Manager'이고, 다른 하나는 'Human Model Agent'이다. 이 두 가지 모듈과 기존의 CAD시스템의 통합된 구조의 개요는 다음과 같다.

SolidWorks는 널리 사용되고 있는 3차원 CAD 시스템 중의 하나로, 대형 어셈블리 설계나 제품 설계

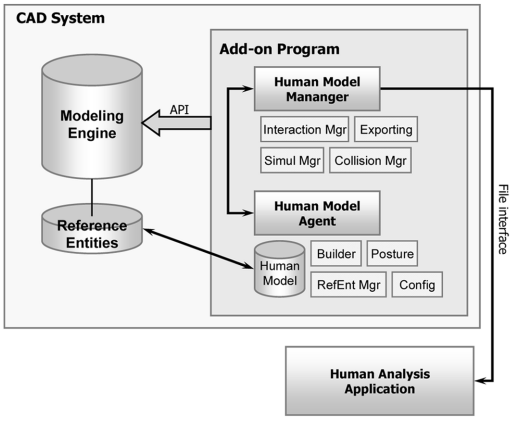


Fig. 10. 본 논문에서 제안된 시스템의 개요.

과정에서 물리적 시뮬레이션 기능을 제공하고 있지만, 제품의 설계 과정 시에 인체를 고려할 수 있는 기능은 포함되어 있지 않다. 본 논문에서는 SolidWorks의 API를 이용하여 SolidWorks 내에 add-in 모듈의 형태로 디지털 인체 모델을 위한 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 3차원 CAD 시스템 내에서 디지털 인체 모델을 생성할 수 있다.

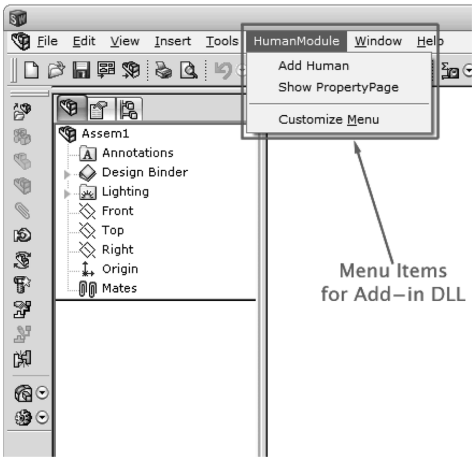


Fig. 11. Add-in 모듈을 위한 메뉴 아이템과 툴바.

4.1.2 통합 CAD 시스템 내에서의 인체 모델 생성

앞서 언급한 대로, 상용 CAD시스템과 통합 가능한 디지털 휴먼 모듈은, 두 개의 하부 모듈인 Human Model Agent(HMA)와 Human-Model Manager (HMM)으로 구성된다.

Human Model Agent(HMA)는 인체 모델을 그래픽 윈도우에 디스플레이를 하고, 인체 모델의 자세를 결정하며, Reference Entity(REs)를 관리하는 역

할을 한다.

Solidworks는 자체적인 그래픽 윈도우를 보유하고 있다. Solidwokrs의 그래픽 윈도우에 커스터마이즈된 디스플레이 루틴을 추가하기 위해서 Solidworks API의 이벤트 시스템이 사용되었다. STL 파일 형태의 인체 골격 기하 정보 파일을 import하여 HMA의 이벤트 핸들러 함수들이 OpenGL의 기능을 이용하여 인체 모델을 렌더링한다.

단순히 Solidworks API[12]에 커스터마이즈된 디스플레이 루틴을 사용하여 인체 모델을 렌더링한 것으로는, Solidworks 세션과 인체 모델 사이의 연결 관계가 정의되지 않는다. 따라서, 인체 모델의 각 세그먼트에 Reference Entity(REs)를 Solidworks 내부 오브젝트로 생성하고, 이를 이용하여 HMA로 생성된 인체 모델과 Solidworks 내부에서 모델링된 제품간의 상호 작용을 가능하게 한다.

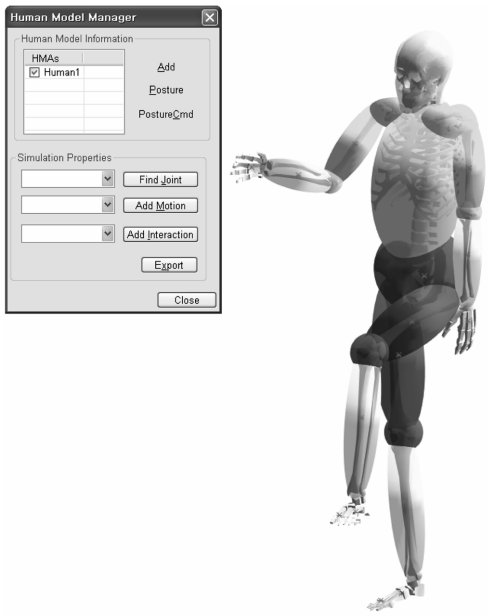


Fig. 12. HMA를 이용한 인체 모델의 생성.

Human-Model Manager(HMM)는 복수의 HMA 인스턴스와 HMA와 제품 모델간의 상호 작용을 관리하는 역할을 한다. 동역학적 해석을 위해서는, 인체 모델과 제품 모델 사이의 상호 관계 조건이 HMM에 의해서 적절히 변환되어 동역학 해석 프로그램에서의 해석을 위한 적절한 초기 조건으로 전달되어야 한다.

4.1.3 인체 모델의 자세 제어

본 연구에서 인체 모델의 자세를 제어하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 하나는 커맨드 기반의 자세 제어 방법이고, 다른 하나는 인체를 구성하는 각 조인트의 자유도를 수동으로 조절하여 정기구학적 방법을 이용하는 자세 제어 방법이다.

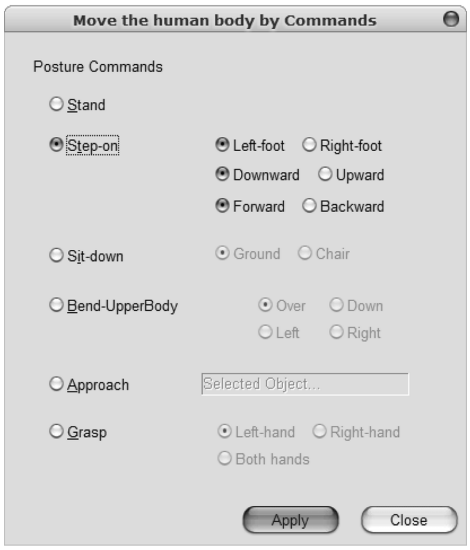


Fig. 13. 커맨드 기반 자세 제어를 위한 다이얼로그.

위와 같은 커맨드들은 순서에 따라 조합하여 사용이 가능하다. 예를 들어, 사용자는 'Step-on' 명령과 'Bend-Upperbody' 명령을 조합하여 결합된 자세를 생성할 수 있다.

위의 커맨드들은, 인체 모델에 결합되어 있는 Reference Entity(REs)와 Solidworks에서 모델링된 제품 간의 위치 관계를, 앞서 언급한 역기구학 알고리즘인 IKAN을 사용하여 결정하도록 하는 것이다. 위의 다이얼로그 안에 정의되어 있는 자세 설정 커맨드들에 대한 개념은 다음 그림과 같다.

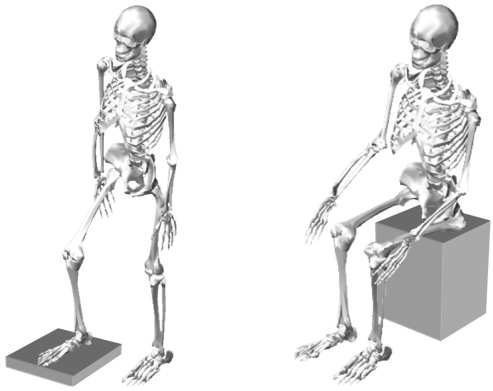


Fig. 14. (a) Stepping-on(with right foot), (b) sitting-on.

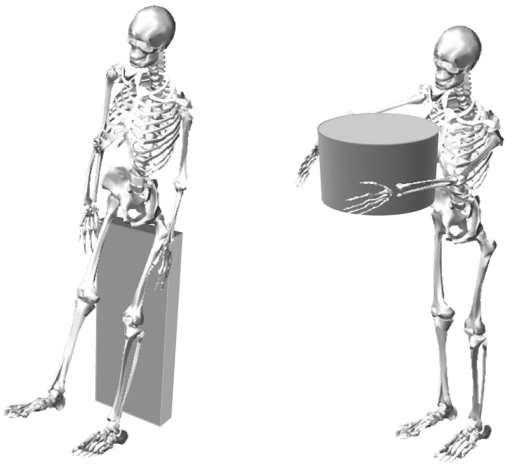


Fig. 15. (a) Leaning-against, (b) Lift an object in arms.

이와 같이 커맨드에 의해서 대략의 자세를 형성한 다음에는, 사용자가 인체 모델의 40자유도중 원하는 조인트에 대한 값을 수동으로 조정하여 정기구학적 방법에 의해서 정밀한 형태의 원하는 자세를 형성할 수 있다.

자세를 제어하는 도중에, 현재 상태의 자세를 저장하고 다음에 불러올 수 있다. 따라서 다양한 형태의 여러 자세들을 저장해 놓고, 이를 제품 모델링 작업 시 불러들여서 제품 설계를 위한 시각적 설계 레퍼런스로 활용할 수 있다.

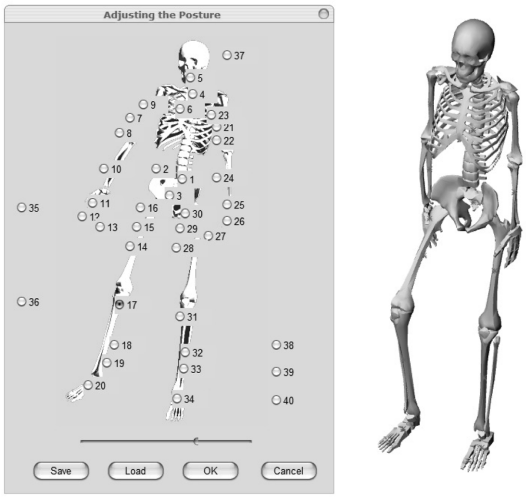


Fig. 16. 각 조인트 값의 변경을 통한 수동 자세 제어.

이러한 기능들을 활용하여, 인체를 고려해야 하는 환경에서 인체의 자세를 적절히 형성하여, 설계 공간이 인간에게 적절한 활동 공간을 제공해 주는지 등에 대한 여부를 시각적으로 평가할 수 있다. 다음 Fig. 17은 자동차 운전석에서 인체 모델을 불러 와서 운전 자세를 설정하여 적절한 공간이 확보되는지를 테스트 해 본 결과이다.

Fig. 17. 자동차 운전석 모델링 환경에서의 인체 모델.

4.2 생체 역학 소프트웨어와 연동을 통한 해석

앞서 언급한 대로, LifeModeler나 SIMM, 그리고 ANYBODY[13]와 같이 인체의 동작에 대한 생체 역학적 해석을 수행할 수 있는 소프트웨어들이 존재한다. SIMM의 경우는 제품이나 기타 주변 환경과 같이 인간의 동작을 해석하는 것이 상당히 어렵다. ANYBODY의 경우는 제품과 인간을 같이 해석할 때 CAD에서 설계된 제품의 정보를 해석 프로그램의 고유의 포맷으로 변동시켜야 한다. LifeModeler의 경우는 동역학 해석 프로그램인 ADAMS의 add-in 프로그램이기 때문에 SIMM이나 ANYBODY에 비하면 제품과 인간을 같이 해석하는 점에 있어서는 가장 편리하다. 그러나 ADAMS 역시 CAD 시스템에서 모델링 된 제품의 기하 정보를 import 시키고 질량 관련 정보들(질량, 질량 중심, 주 관성 주축, 주 관성 모멘트 등)을 계산한 후에 LifeModeler로 인체 모델을 생성하여 제품과 결합시키는 수고를 거친 후에야 비로소 해석 작업을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 LifeModeler에서 해석을 쉽게 해 주기 위해서, 제품과 인체 모델과의 상호 관계를 설정해 준 다음 본 연구에서 개발된 HMM을 이용하여 LifeModeler에서 해석에 필요한 정보를 바로 제공하여 즉시 생체역학적 해석이 가능한 모델을 생성할 수 있도록 구현하여 해석 프로그램에서의 수고를 덜 수 있도록 하였다.

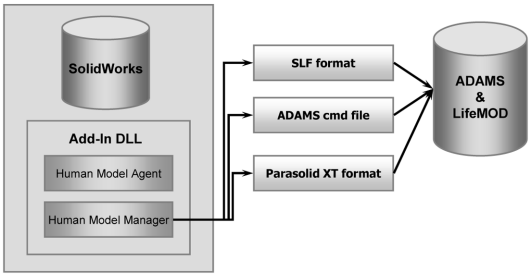


Fig. 18. ADAM와 LifeModeler로의 데이터 전송.

4.3 해석 사례

지금까지 서술한 본 연구 내용을 토대로, 몇 가지 경우에 대해 제품-인체 통합 모델링 시스템과 생체 역학 해석 소프트웨어의 연동 작업을 수행해 보았다.

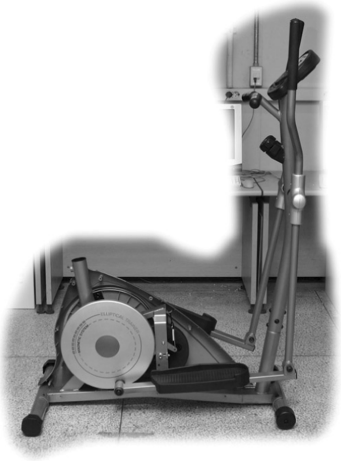
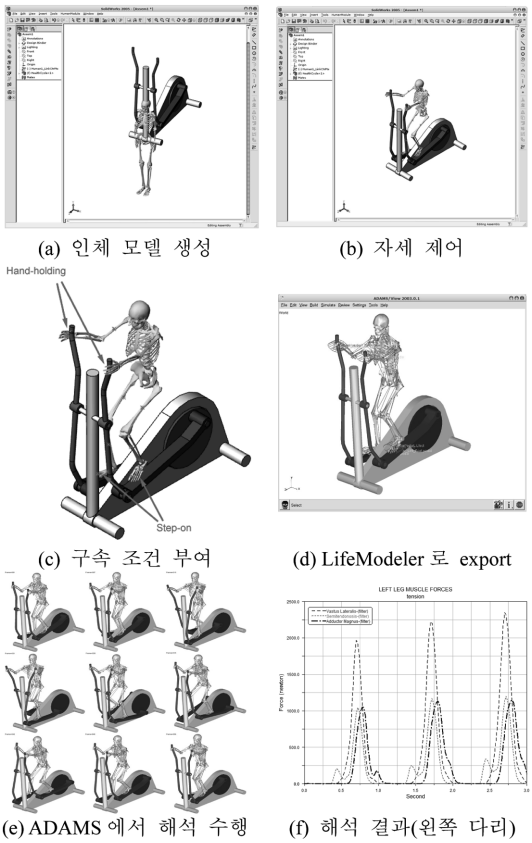


Fig. 19. Elliptical Trainer.

Fig. 19는 Elliptical Trainer라고 불리는 운동기구이다. 이 기구상에 사람이 올라가 실제로 운동을 수행하게 되면 상당히 복잡한 동작을 수행하므로 본 연구에서 해석 사례로 선정하게 되었다. 다음은 모델링 과정부터 해석까지의 전 과정을 도식화 한 것이다.

먼저, Fig. 20의 (a)를 보면 SolidWorks CAD 시스템 상에서 해석을 필요로 하는 제품 어셈블리를 불러 들이고, 여기에 디지털 인체 모델을 추가하게 된다. (b)에서는 앞서 언급한 IKAN역기구학을 응용하여 제품을 사용하는 인체 모델의 자세를 설정하게 된다. (c)에서는 생체 역학적 해석을 위해 필요한, 제품과 사람 사이의 상관 관계(구속 조건)을 정의해 주게 된다. 이런 식으로 제품과 인체 모델의 모델링 및 해석을 위한 조건 설정의 단계가 마무리 되면, (d)와 같이 해석을 위한 제품 및 인체 정보가 ADAMS와



(a) 인체 모델 생성 (b) 자세 제어

(c) 구속 조건 부여 (d) LifeModeler 로 export

(e) ADAMS 에서 해석 수행 (f) 해석 결과(왼쪽 다리)

Fig. 20. 통합모델링으로부터 생체해석 연동 수행 과정.

LifeModeler로 전송되게 된다. (e)에서는 3초간의 운동 과정의 해석을 위해 150스텝으로 나누고 해석을 실시하였다. (f)는 그 해석 결과를 그래프로 도식화 한

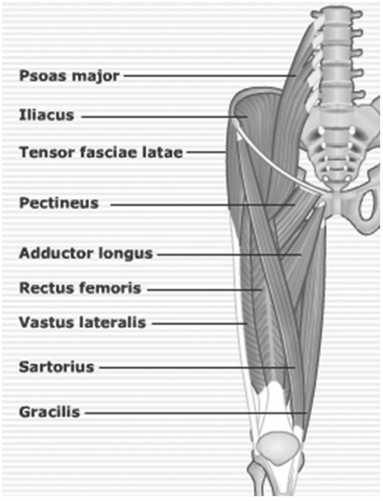
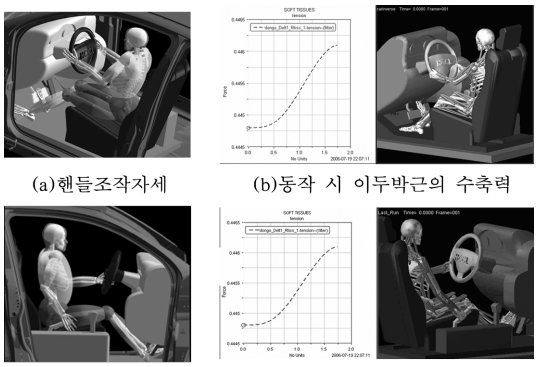


Fig. 21. 외측광근(Vastus Lateralis)의 해부학적 위치.

결과이다. 다리의 운동과 관계된 근육들 중 외측광근(Vastus Lateralis), 대내전근(Adductor Magnus), 반건양근(semitendinosus)의 3개 근육에 걸리는 힘을 표시하였는데, 이 3개 근육에 대한 해부학적 위치는 Fig. 21과 같다. 이들 중 외측광근에 걸리는 힘이 가장 크므로, 이 elliptical trainer 운동 기구를 사용할 시에, 외측광근을 발달시키는 효과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 이렇게 운동 기구를 설계 하는 단계에서, 생체 역학적 해석을 통해 인체에 미치는 영향을 설계 단계에서 파악을 할 수 있다.

다음 Fig. 22는 CAD시스템에서 자동차 내장 설계 시 인체 모델로 적절한 동작 범위를 파악하고, 이를 LifeModeler로 export하여 해석을 수행함으로써, 핸들 조작 동작 및 사이드 브레이크 조작 동작 시에 인체의 이두박근에 걸리는 수축력을 시간에 따라 분석한 결과이다. 아래 그래프에서 x축은 시간이고, y축은 시간에 따른 이두박근의 수축력을 나타낸다. 시간에 따라서 디지털 인체 모델은 핸들을 돌리거나 사이드브레이크를 당기는 동작을 하게 된다.



(a)핸들조작자세 (b)동작 시 이두박근의 수축력

(c)사이드브레이크 (d)동작 시 이두박근의 수축력

Fig. 22. 차량 내부에서 동작에 따른 생체역학적 해석.

5. 결 론

본 연구의 목표는 제품을 설계하는 단계에서 제품과 사용자간의 상호 연관관계를 분석하고 이를 이용하여 인체공학적 측면에서 사용자의 편의성이 개선된 제품을 설계할 수 있는 통합 시스템을 구현하는 것이다. 이를 위해 상용 CAD 시스템의 API를 이용하여 제품 설계과정에 디지털 인체모델을 생성하는 기술, 이를 이용해 인체의 자세 및 제품과 인체의 구속조건을 정의해 볼 수 있는 기술, 그리고 제품 사용시의 인체의 동작을 인체공학적 시뮬레이션 소프트웨어와 연동하는 기술을 개발하였다. 개발된 통합 시스템을 이용하여 운동기구, 자동차와 같은 제품의 설계 단계에서 사용자가 제품을 사용하는 동작을 인체공학적 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 분석해 볼 수 있었다.

이러한 새로운 인간공학적 설계를 지원하는 인체-제품 통합 설계 시스템은 설계 단계에서 제품의 사용자 친화성을 극대화할 수 있는 기능을 갖춤으로써, 기존에 프로토타입이나 양산된 제품의 시험사용 및 통계를 이용한 인체공학적 분석 방법을 획기적으로 개선할 수 있다. 이러한 설계 패러다임은 일반적인 소비재 제품뿐만 아니라 스포츠 역학, 의료 기기 산업 등에도 폭넓게 활용될 수 있다.

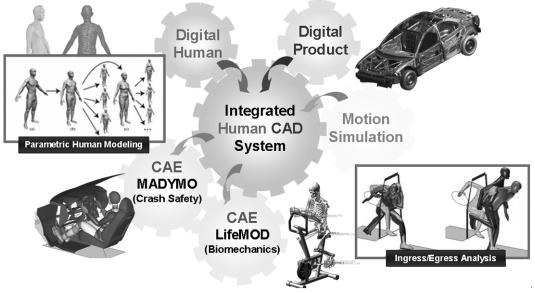


Fig. 23. 통합된 Human CAD 시스템 구현 목표.

인간공학적 설계를 지원하는 인체-제품 통합 설계 시스템의 구축에 이어, 활용도를 높일 수 있는 연구과제로서 Fig. 23과 같이 다양한 주제의 연구를 향후 과제로 계획하고 있다.

첫 번째로 Fig. 24와 같이 체형, 인종 및 연령 등의 조건을 입력하면 이러한 입력 정보에 근거한 인체 모델을 생성할 수 있도록 하는 파라메트릭 인체 모델에 관한 연구를 수행할 계획이다. 파라메트릭한 인체의 모델링을 구현함으로써 개별 사용자에 맞추어진 제품 설계 또는 사용자층을 고려한 설계변수의 영역을 설정할 수 있다.

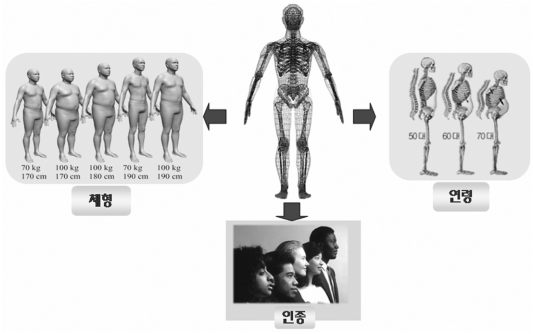


Fig. 24. 파라메트릭 인체 모델 생성 개념.

다음으로는 Fig. 25와 같이 인체 동작의 모션 캡쳐 데이터베이스 구축 연구를 수행할 계획이다. 자동차의 승・하차와 같은 동작을 모션 캡쳐를 통해 분석하고, 이를 토대로 가장 편안한 동작을 수행할 수 있는 자동차 도어의 형상을 설계하는데 도움을 줄 수 있다.

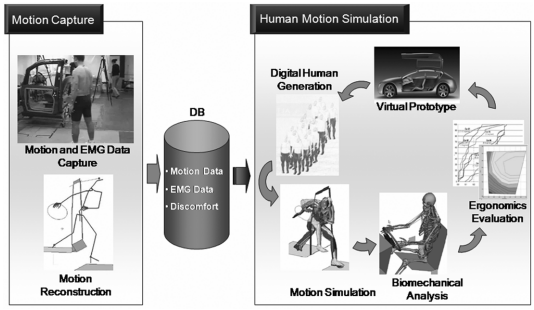


Fig. 25. 모션 캡쳐를 이용한 승・하차 동작 분석

이 외에도, Human CAD시스템에서의 차량 설계와 차량 충돌 해석 프로그램과의 연계 해석, 생체 역학 해석 결과를 근거로 제품 설계 데이터의 파라미터 수정 등의 연구가 더불어 진행될 계획이다.

감사의 글

본 연구의 결과물은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다. 또한 이 연구는 부분적으로 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원을 받았습니다.

참고문헌

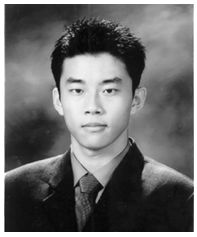
1. Xudong Zhang and Don B. Chaffin, “Digital Human Modeling for Computer-aided Ergonomics”, Handbook of Occupational Ergonomics, CRC Press, 2005.
2. Biomechanics Research Group Inc., http://www.life-modeler.com/
3. ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), http://www.mscsoftware.com/products/adams.cfm/
4. SIMM(Software for Interactive Musculoskeletal Modeling), http://www.musculographics.com/
5. SD/FAST, http://www.sdfast.com/
6. RAMSIS(Realistic Anthropometrical Mathematical System for Interior-comfort Simulation), http://www.human-solutions.com/
7. SAFEWORK, http://www.safework.com/safework_pro/sw_pro.html/
8. JACK, http://www.ugs.com/products/tecnomatix/human_performance/jack/
9. CATIA V5 Human Solutions, http://www.3ds.com/products-solutions/plm-solutions/catia/overview/
10. H-ANIM, http://h-anim.org/
11. IKAN(Inverse Kinematics using Analytical Methods), http://cg.cis.upenn.edu/hms/software/ikan/ikan.html/.
12. SolidWorks and Add-Ins API Help, SolidWorks 2005, http://www.solidworks.com/
13. ANYBODY, http://www.anybodytech.com/

정 문 기

2004년 서울대학교 기계항공공학부 학사
2006년 서울대학교 기계항공공학부 석사
2006년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정
관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Digital Human Modeling, Computer Graphics, Biomechanics

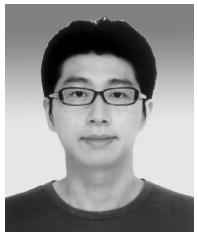
이 건 우

1978년 서울대학교 기계공학과 학사
1981년 M.I.T. 기계공학과 석사
1984년 M.I.T. 기계공학과 박사
1984년~1986년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수
1992년~1993년 M.I.T. 기계공학과 객원부교수
2002년~2003년 Stanford 기계공학과 객원 부교수
1986년~현재 서울대학교 공과대학 기계항공학부 교수
관심분야: CAD, Assembly Modeling, Multi-resolution Modeling, Rapid Prototyping, Medical Device, Human Modeling & Analysis



조 현 덕

2005년 서울대학교 기계항공공학부 학사
2005년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석박통합과정
관심분야: CAD API Programming, Virtual Design & Simulation, Digital Human Model, Biomechanics



김 태 우

2003년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사
2003년~2006년 삼성전자 생활가전총괄 A/C 개발팀 연구원
2006년~현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정
관심분야: CAD, Biomechanics, Optimization

Ma Yanzhao

2001년 Huazhong University of Sci. & Tech. (China) 기계공학과 학사
2004년 Huazhong University of Sci. & Tech. (China) 기계공학과 석사
2004년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정
관심분야: Biomechanics, Human Modeling, PDM

이 상 헌

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사
1988년 서울대학교 기계설계학과 석사
1993년 서울대학교 기계설계학과 박사
1993년~1995년 신도리코 기술연구소 책임연구원
1996년 대우 고등기술연구원 선임연구원
1996년~현재 국민대학교 교수
관심분야: CAD/CAM, 3D Geometric Modeling, Die & Mold Design, Automotive Design, Human-centered CAD