



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

**인체 근골격 동역학 시뮬레이션을 위한
다중해상도 근육 모델**

**Multi-resolutional Muscle Model
for Human Musculoskeletal Dynamic Simulations**

2013년 2월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

이 상 준

**인체 근골격 동역학 시뮬레이션을 위한
다중해상도 근육 모델**

**Multi-resolutional Muscle Model
for Human Musculoskeletal Dynamic Simulations**

지도교수 이 건 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012년 12월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

이 상 준

홍길동의 공학석사 학위논문을 인준함

2012년 12월

위 원 장 _____

부위원장 _____

위 원 _____

초 록

인체 근골격 동역학 시뮬레이션은 동역학 시뮬레이터에 모델링 된 인체 근육과 골격을 이용하여 인체 운동을 분석하는 방법으로, 많은 경우 해석에 사용된 근육 모델이 얼마나 자세한지에 의해 그 정밀도가 결정된다. 특히 최근에는 초음파 검사, 컴퓨터 단층촬영, 자기공명영상 등 측정 기술의 발전과 함께 다양한 시뮬레이션 환경에서 사용할 수 있는 매우 자세한 인체 모델들이 개발되고 있으며, 이러한 추세에서 이전처럼 무조건적으로 더 복잡한 모델을 쓰기보다는 시뮬레이션의 목적과 조건에 따라 모델의 복잡도를 조절하려는 방향으로의 수요가 생겨나고 있다. 그러나 근육 모델의 복잡도를 체계적으로 조절하는 알고리즘에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없으며, 오랜 기간 다양한 복잡도로 축적된 인체 근육 데이터들을 하나의 체계 하에 담아내는 것이 매우 시급한 실정이다.

본 연구에서는 컴퓨터이용설계 분야에서 사용되던 ‘다중해상도’ 개념을 인체 동역학 근육 모델에 도입하여, 조건에 따라 근육 모델의 복잡도를 조절할 수 있는 ‘다중해상도 근육 모델(multi-resolutional muscle model)’을 제안하고자 한다. 이를 위해 근육 모델의 해상도를 기능적 해상도와 구조적 해상도의 두 가지 차원으로 정의하였고, 각각에 대한 해상도 변화 알고리즘도 논의하였다. 이러한 다중해상도 근육 모델을 활용하면 인체 시뮬레이션의 효율성을 증대시킬 수 있음은 물론, 제각기 축적되었던 인체 근육 데이터 및 근력 산출 알고리즘들이 하나로 통합된 새로운 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 인체 근골격 동역학 시뮬레이션, 근육 모델, 다중해상도, 생체역학
학 번: 2011-20734

Contents

제 1 장 서론.....	1
제 2 장 동역학 근육 모델 구현.....	5
2.1 근육 모델의 구조.....	5
2.2 근육 모델의 동작 원리.....	8
2.3 근육 모델의 적용.....	13
제 3 장 근육 모델의 해상도.....	16
3.1 기능적 해상도.....	16
3.2 구조적 해상도.....	17
제 4 장 다중해상도 근육 모델과 해상도 변화.....	19
4.1 기능적 해상도 변화.....	19
4.2 구조적 해상도 변화.....	21
4.3 더 높은 해상도로의 확장.....	27
제 5 장 다중해상도 근육 모델의 활용.....	28
5.1 인체 시뮬레이션의 효율성 증대.....	28
5.2 통합된 근육 모델 시스템 구축.....	28
제 6 장 결론 및 논의.....	29
Bibliography.....	30
Abstract.....	33

List of Figures

Figure 1	다양한 상용 인체 근골격 동역학 시뮬레이션 소프트웨어의 예.....	1
Figure 2	인체 근육 모델 정밀도의 발전 과정.....	2
Figure 3	복잡도를 조절할 수 있는 다중해상도 솔리드 모델의 예.....	3
Figure 4	RoboticsLab의 실행 화면; 다이어그램 패널 및 모델 패널.....	5
Figure 5	RoboticsLab 디바이스의 기본 작동 구조.....	6
Figure 6	RoboticsLab 기반 동역학 근육 모델의 기본 작동 구조.....	7
Figure 7	RoboticsLab 기반 인체 근골격 모델의 기본 구조.....	8
Figure 8	RoboticsLab 기반 근육 모델 디바이스의 기본 작동 구조.....	10
Figure 9	RoboticsLab 기반 근육 모델에 포함된 근육의 힘-길이-속도 곡선.....	11
Figure 10	해석적인 근육-힘줄 평형의 풀이 방법.....	11
Figure 11	근육-힘줄 평형 알고리즘 및 힘줄 장력-길이 곡선.....	12
Figure 12	구현된 상완 이두근 모델 및 해당 *.dml 파일 구조.....	13
Figure 13	RoboticsLab 기반 인체 근골격 모델의 실행 화면.....	14
Figure 14	RoboticsLab 기반 근육 모델 및 이를 포함한 인체 모델의 예.....	15
Figure 15	중둔근의 실제 형상 및 OpenSim, AMS에서의 중둔근 모델.....	18
Figure 16	다양한 해상도의 근력 계산 알고리즘 및 근육 특성 변수.....	20
Figure 17	RoboticsLab 기반 근육 모델에 구현된 기능적 해상도 변화 기능.....	21
Figure 18	근집화를 통한 근육 모델의 구조적 해상도 변화 과정 모식도.....	22
Figure 19	실제 근육의 계층적 구조.....	23
Figure 20	우측 삼각근 모델의 구조적 해상도 변화 과정.....	23
Figure 21	우측 삼각근 모델의 계통도.....	24

Figure 22 우측 삼각근 모델의 구조적 해상도 변화.....	24
Figure 23 우측 대내전근 모델의 구조적 해상도 변화 과정.....	25
Figure 24 우측 중둔근 모델의 구조적 해상도 변화 과정.....	26

제 1 장 서론

인체 근골격 동역학 시뮬레이션(human musculoskeletal dynamic simulation)은 다물체 동역학 시뮬레이터에 인체 근육과 골격을 모델링하고, 이를 구동시켜 인체 운동을 분석하는 방법이다[1-2]. 근골격 시뮬레이션은 관절 구조의 동역학만을 계산하는 일반 시뮬레이션과 달리 근력 발생 원리 등 인체의 생리·해부학적 특성까지 고려한다는 장점을 가지고 있다. 또한 외과적 수술이나 측정 장비의 체내 삽입 등 침습적인 과정이 불필요하기 때문에, 오늘날 인체 운동 분석에 가장 널리 이용되는 방법으로 자리매김하고 있다. **Figure 1**에서 볼 수 있듯이 현재 AnyBody Modeling System[3-4] (AnyBody Technology A/S, Denmark), OpenSim[5-6] (Stanford University, USA), SIMM[7-8] (MusculoGraphics Inc., USA) 등 여러 동역학 엔진들이 인체 근골격 동역학 시뮬레이션을 위해 사용되고 있으며, 그 분석 결과는 인체공학적 제품 설계, 의용생체공학 및 재활공학, 스포츠 과학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

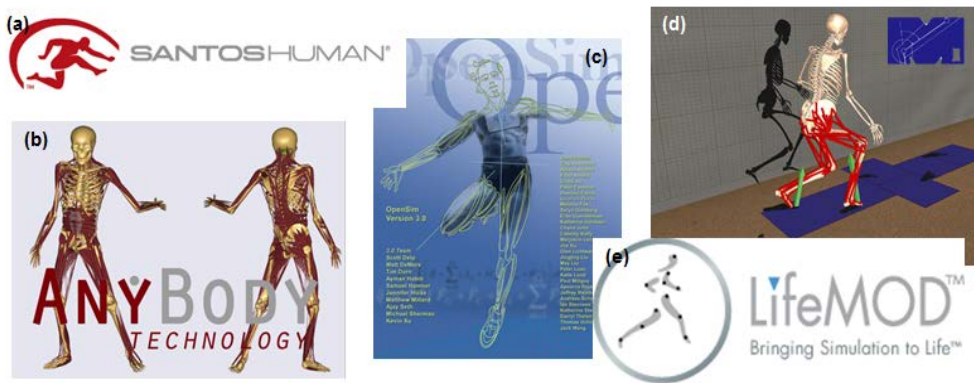


Figure 1 다양한 상용 인체 근골격 동역학 시뮬레이션 소프트웨어의 예; (a) SantosHuman[9] (SantosHuman Inc., USA), (b) AnyBody Modeling System (AnyBody Technology, Denmark), (c) OpenSim (Stanford University, USA), (d) SIMM (MusculoGraphics Inc., USA), (e) LifeMOD[10] (LifeModeler Inc., USA).

많은 경우 이러한 인체 근골격 동역학 시뮬레이션의 정밀도는 해석에 사용된 인체 모델, 그 중에서도 근육 모델의 복잡도에 의해 크게 제한을 받는다 [11]. 특히 과거에는 이용 가능한 인체 데이터가 많지 않았기 때문에, **Figure 2**의 왼쪽 그림과 같이 근육 모델이 실제에 비해 지나치게 단순화된 경우가 많았다[12]. 결과적으로 근육 모델이 얼마나 자세한지가 시뮬레이션의 정밀도를 직접적으로 결정했고, 대부분의 연구들도 더 자세한 데이터를 축적하고 더 복잡한 근육 모델을 사용하려는 방향으로 진행되어왔다.

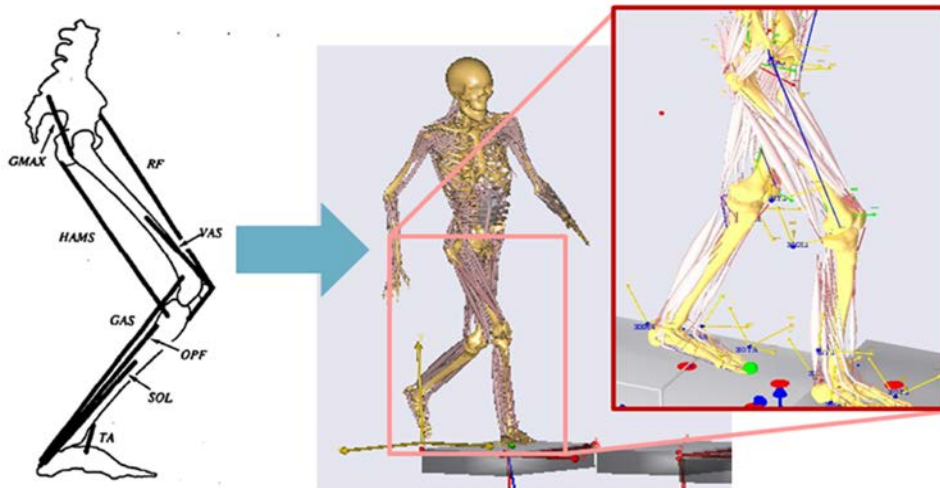


Figure 2 인체 근육 모델 정밀도의 발전 과정. 왼쪽의 과거 모델(Pandy, 1990)과 비교할 때, 현재 AnyBody Modeling System에서 사용되는 인체 모델의 복잡도와 정밀도가 훨씬 높아졌음을 알 수 있다.

그러나 최근에는 초음파 검사(US), 컴퓨터 단층촬영(CT), 자기공명영상(MRI) 등 측정 기술의 발전과 함께 이용 가능한 인체 데이터가 많이 축적되었고, 이에 따라 **Figure 2**의 오른쪽 그림과 같이 다양한 시뮬레이션 환경에서 사용할 수 있는 매우 자세한 인체 모델들이 개발되고 있다. 이러한 추세에서 무조건

적으로 더 복잡한 모델을 쓰기보다는 시뮬레이션의 목적과 조건에 따라 모델의 복잡도를 조절하려는 방향으로의 수요가 생겨나고 있으며[13-14], 실제로 일부 시뮬레이터에서는 제한적이거나 이와 유사한 기능을 제공하기도 한다. 그러나 인체 근육 모델의 복잡도를 체계적으로 조절하는 방법에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없으며, 오랜 기간 다양한 복잡도로 축적된 인체 근육 데이터들을 하나의 체계 하에 담아내는 것이 매우 시급한 실정이다.

한편, 컴퓨터이용설계(CAD) 분야에서는 **Figure 3**과 같이 상세 수준(LOD; level of detail)을 조절하여 해석 목적에 따라 복잡도를 변경할 수 있는 솔리드 모델에 대한 연구가 이루어져 왔는데, 이러한 모델을 ‘다중해상도 모델(multi-resolutional model)’이라 한다[15-16]. 예를 들어, 해당 모델을 대상으로 유한요소해석을 수행할 때에는 모델의 세부적인 요소들이 모두 중요하므로 상세 수준을 높게 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 해당 모델이 전체 시스템에 비해 비교적 작은 부분을 차지하는 동역학 해석을 한다면, 상세 수준을 낮추어 해석의 효율성을 높일 수 있다. 만약 이러한 다중해상도 개념을 인체 근육 모델에도 도입할 수 있다면 근육 모델의 복잡도를 체계적으로 조절하는 새로운 패러다임을 정립할 수 있을 것이다.

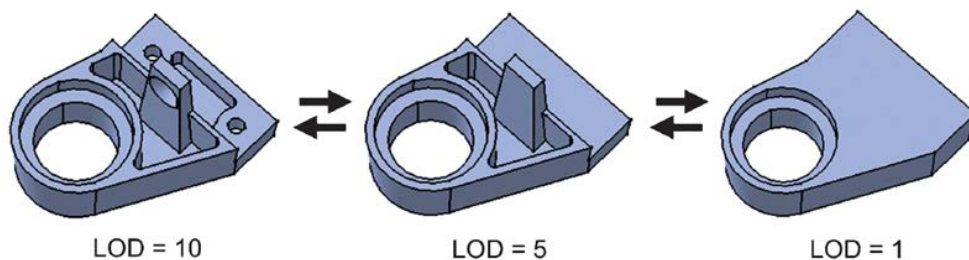


Figure 3 복잡도를 조절할 수 있는 다중해상도 솔리드 모델의 예 (Lee, 2005).

본 연구에서는 인체 동역학 근육 모델에 ‘해상도(resolution)’의 개념을 도입하여, 조건에 따라 근육 모델의 복잡도를 조절할 수 있는 ‘다중해상도 근육 모델(multi-resolutional muscle model)’을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 인체 근육 모델에서의 해상도가 무엇을 뜻하는지 정의하였고, 해상도를 체계적으로 변경할 수 있는 ‘해상도 변화(resolution change)’ 알고리즘을 구상하였다. 또 이러한 다중해상도 근육 모델의 활용 방안도 몇 가지 생각해 보았다.

제 2 장 동역학 근육 모델 구현

본격적으로 다중해상도 근육 모델을 다루기에 앞서, 동역학 시뮬레이터의 하나인 RoboticsLab[17-18] (SimLab Co. Ltd., Korea) 상에 인체 근육의 생리·해부학적 특성을 반영한 동역학 근육 모델을 구축하였다. **Figure 4**에서 볼 수 있듯이 RoboticsLab은 본래 로봇 시뮬레이션을 목적으로 개발되었으나, C++ 기반 프로그래밍을 통해 다양한 사용자 지정 객체를 포함시킬 수 있어 근육 모델을 포함한 동역학 시뮬레이션을 수행하기에 적합하다.

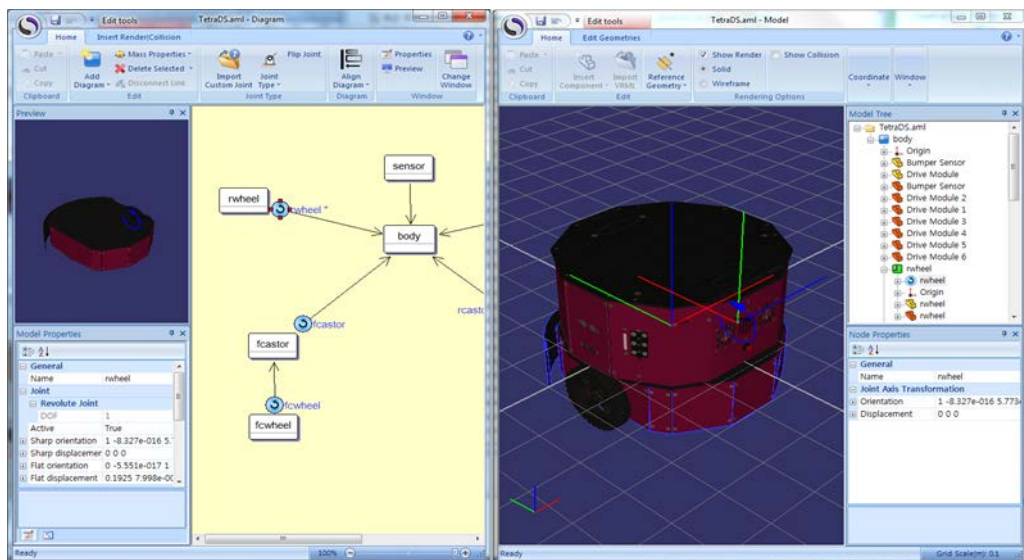


Figure 4 RoboticsLab의 실행 화면; 다이어그램 패널(좌) 및 모델 패널(우).

2.1 근육 모델의 구조

근육 모델은 RoboticsLab에서 제공하는 기능 중 ‘디바이스(device)’라는 요소를 기반으로 구성되었다. RoboticsLab 디바이스는 본래 리니어 액추에이터, 서

보 모터 등의 액추에이터, 혹은 가속도 센서, IR 센서 등의 센서 요소로 사용되는 것으로, 이는 인체 모델에서 근육이 인체를 구동시키는 액추에이터로서 작용한다는 점으로 볼 때 타당한 구성이라 할 수 있다. RoboticsLab 디바이스는 **Figure 5**와 같이 디바이스의 특성 값들을 저장하고 있는 *.dml 형식으로 구성되어 있으며, 각 *.dml은 *.rdd 형식의 DLL(dynamic-link library) 경로를 지정하고 있다. 이 *.rdd는 C++ 기반의 프로그래밍을 통해 디바이스의 센서, 혹은 액추에이터로서의 기능을 나타낸다. 예를 들어 모델 하나에 두 개의 서보 모터가 포함되어 있다면 모델에는 Servo_1.dml과 Servo_2.dml, 두 개의 *.dml이 포함되며, 이 두 개의 디바이스는 각각의 특성 값을 저장함과 동시에 서보 모터로서의 기능을 나타내는 Servo_Motor.rdd를 공통으로 지정하게 된다.

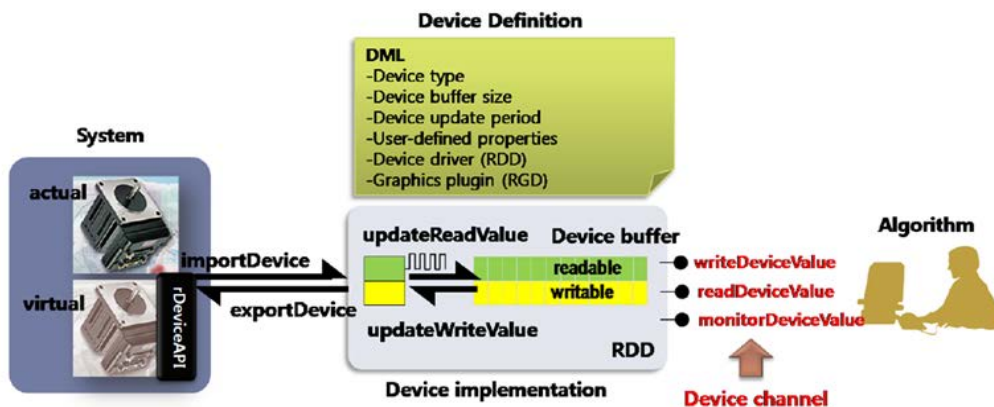


Figure 5 RoboticsLab 디바이스의 기본 작동 구조 (박종훈, 2007).

RoboticsLab 기반 동역학 근육 모델에서도 이러한 RoboticsLab 디바이스의 구조를 차용하여, 먼저 C++ 기반의 프로그래밍을 통해 근력이 발생하는 생리학 특성을 나타내는 Muscle.rdd를 구성하였다. 각 근육 디바이스 *.dml, 예컨대 Biceps.dml, Gastrocnemius.dml 등은 모두 이 Muscle.rdd의 경로를 지정하고

있으며, 이러한 구조를 **Figure 6**에 나타내었다. 여기에 포함된 근육의 생리·해부학적 특성에 대해서는 뒤에서 자세히 설명하기로 한다.

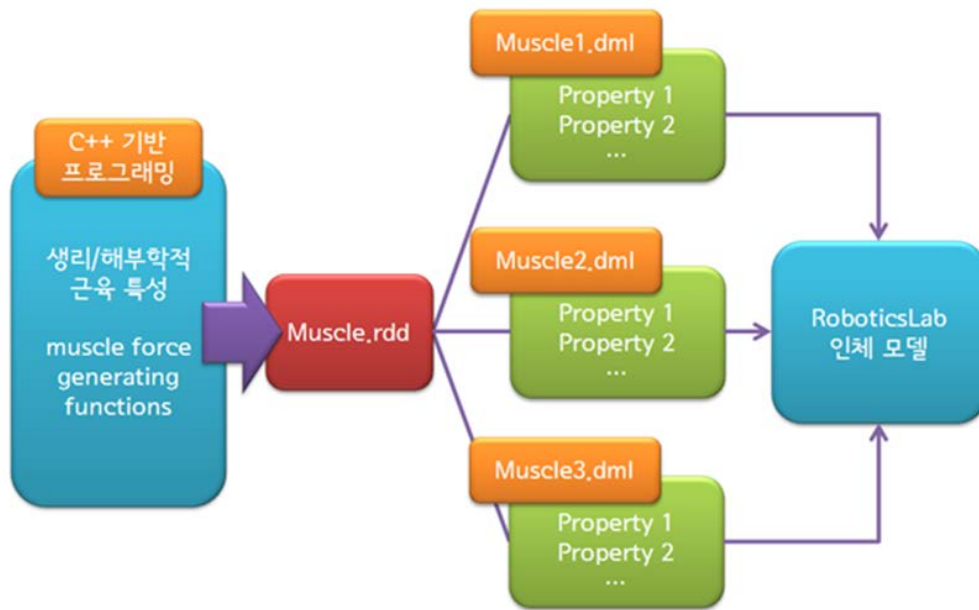


Figure 6 RoboticsLab 기반 동역학 근육 모델의 기본 작동 구조.

모델의 내부 구조 측면에서 보면 RoboticsLab 디바이스는 모델을 구성하는 각 바디, 관절, 혹은 시스템 자체에 하위 개념으로 저장되며, 이를 각각 바디 디바이스, 관절 디바이스, 시스템 디바이스라 일컫는다. RoboticsLab 기반 근육 모델은 바디 디바이스로서, **Figure 7**과 같이 인체를 구성하는 여러 바디 중에서도 시스템 좌표계에 고정되는 가상의 베이스 바디에 모든 근육을 저장하도록 구성하였다. 실제 인체에서는 근육이 하나 이상의 관절에 걸쳐 다수의 바디를 연결하는 구조로 되어 있기 때문에 이처럼 베이스 바디에 모든 근육이 저장되는 방식이 다소 불합리하게 생각될 수 있으나, 근육은 특정한 바디나 관절 하

나에 종속적으로 속하는 개념이 아니기 때문에 다른 바디나 관절에 저장하는 방식에도 마찬가지로 무리가 있다. 또한 베이스 바디에 모든 근육을 저장하는 경우에는 베이스 바디를 중심으로 관절과 바디로 연결된 인체의 골격계와 근육들로 이루어진 근육계가 명확히 분리되는 구조가 되어, 오히려 직관적으로 이해하기 편하다는 장점이 있다. AnyBody Modeling System, OpenSim 등 기존의 인체 근골격 시뮬레이터들은 인체 모델의 골격계와 근육계 트리를 확인하는 기능을 각각 제공하고 있는데, RoboticsLab 기반 인체 모델에서도 베이스 바디에 포함된 디바이스 목록을 확인함으로써 근육계 트리를 확인할 수 있다.

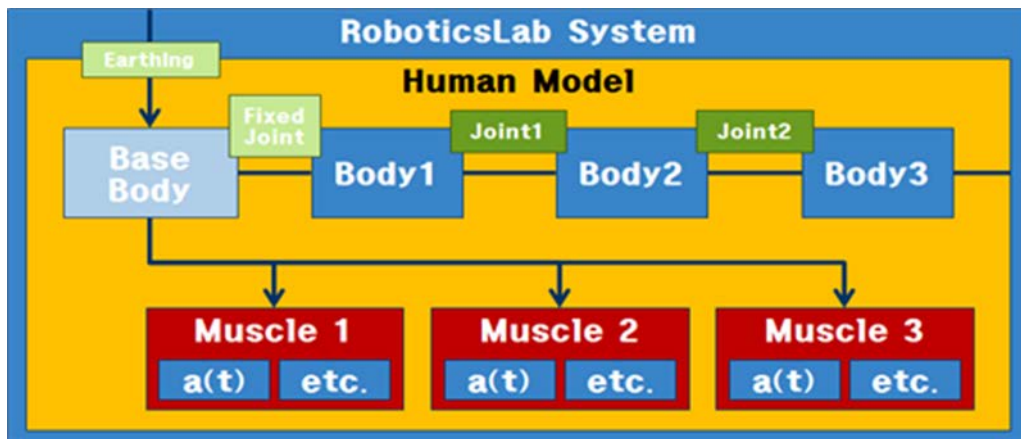


Figure 7 RoboticsLab 기반 인체 근골격 모델의 기본 구조.

2.2 근육 모델의 동작 원리

앞서 언급하였듯이, RoboticsLab 기반 근육 모델의 *.dml들은 모두 Muscle.rdd 라는 DLL의 경로를 지정하고 있으며, 이 DLL은 C++ 기반 프로그래밍을 통해 근육의 생리·해부학적 특성을 포함하고 있다. 디바이스가 포함된 RoboticsLab

프로그램은 기본적으로 다음의 세 솔루션 파트로 구성되어 있다.

- ① 어플리케이션: 모델과 환경 정보를 포함
- ② 디바이스 플러그인: 모델에 포함된 디바이스의 특성을 포함
- ③ (디바이스) 그래픽스 플러그인: 디바이스의 시각화 정보를 포함

RoboticsLab 기반 근육 모델도 이러한 구조에 따라 디바이스 플러그인에서 근육의 생리·해부학적 특성을 포함하고, 그래픽스 플러그인에서는 해당 근육의 시각화를 담당한다. 디바이스 플러그인에서는 현재 근육의 경로, 길이, 수축·인장 속도, 활성화도 등 근육의 모든 정보를 제어하면서, 근육이 어떤 바디에 어느 방향으로 얼마의 근력을 작용시켜야 하는지 계산하여 해당 힘을 부가한다. 근육의 시각화를 위해서는 시스템 좌표계에서 계산된 근육 부착점들의 좌표가 매 프레임마다 그래픽스 플러그인에 전달되어야 하는데, 멀티쓰레딩 기법을 사용하는 RoboticsLab에서 디바이스 플러그인과 그래픽스 플러그인은 서로 다른 쓰레드에서 동작된다. 이로 인해 디바이스 플러그인과 그래픽스 플러그인은 서로 데이터의 교환이 자유롭지 않으며, 따라서 **Figure 8**과 같이 매 프레임마다 근육 시각화에 필요한 데이터를 모아 인터페이스를 통해 디바이스 쓰레드에서 그래픽스 쓰레드로 데이터를 전달한다.

근육의 생리학적 특성에 해당하는 근력 발생 원리는 크게 다음 두 가지 방식을 구현하였다. AnyBody Modeling System, OpenSim 등 기존의 근골격 시뮬레이터들도 기본적으로 동일한 두 가지 방식의 근력 발생 원리를 제공하고 있다.

- ① 근육이 활성화도에 따라 이상적으로 힘을 발생시킴 (이상적인 장력 발생기)
- ② 근육이 근력-길이-속도 상관관계 특성에 따라 힘을 발생시킴

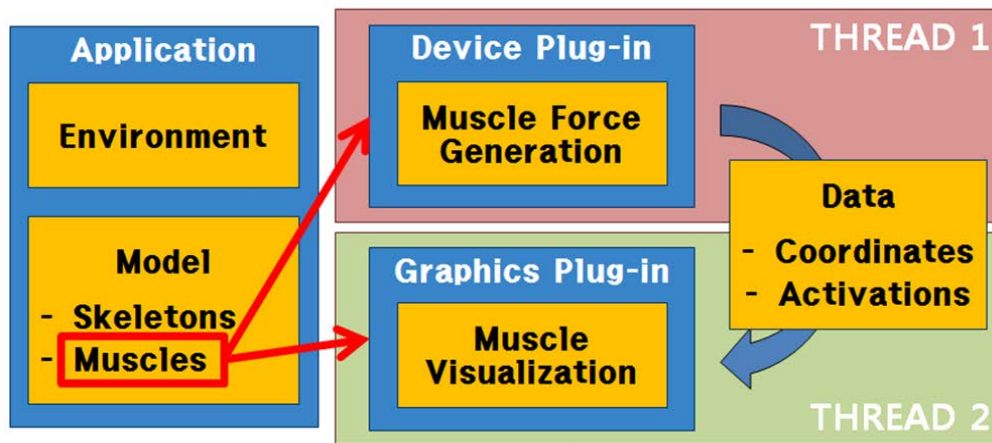


Figure 8 RoboticsLab 기반 근육 모델 디바이스의 기본 작동 구조.

근육을 이상적인 장력 발생기로 가정하는 경우, 근력은 근육의 최적 힘 (optimal force)과 근육활성도의 단순 곱으로 계산된다. 이 때 최적 힘은 근육이 등척(isometric) 조건에서 낼 수 있는 최대 힘을 뜻하며, 근육활성도는 0부터 1 사이의 값으로 나타난다. 반면 근육의 근력-길이-속도 상관관계(muscle force-length-velocity relation)을 고려하는 경우에는 근력이 근섬유의 현재 길이, 수축•인장 속도에도 영향을 받는다. 이러한 모델은 기본적으로 1930년대 A. V. Hill 이 제안한 3-요소 근육 모델(3-element muscle model)을 기반으로 하며[19], 현재 사용되는 대부분의 근육 동역학 모델의 근간이 되고 있다[20-22]. RoboticsLab 근육 모델에는 1990년 S. L. Delp의 논문에서 제시한 근력-길이, 근력-속도 곡선 데이터를 바탕으로 Figure 9와 같은 근력-길이-속도 상관관계 특성을 입력하였다[23].

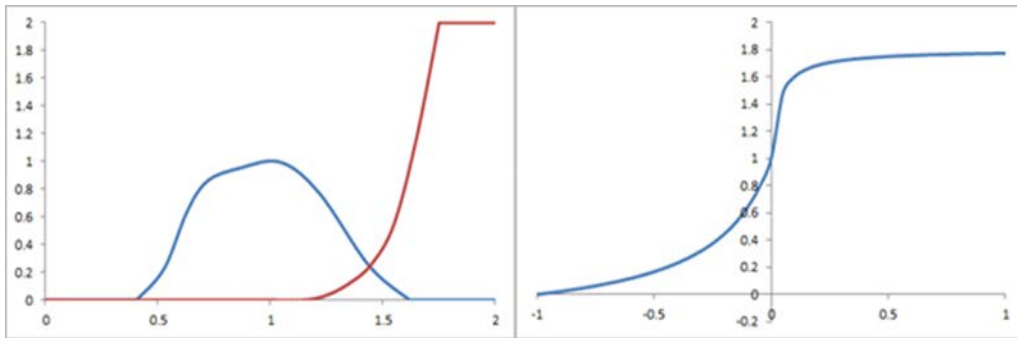


Figure 9 RoboticsLab 기반 근육 모델에 포함된 근육의 힘-길이-속도 곡선.

근육의 근력-길이-속도 상관관계 특성을 따르는 경우, 근육 자체의 특성 뿐만 아니라 근육과 뼈를 연결하는 힘줄의 특성도 함께 고려해야 한다. 현재 대부분의 근육 모델은 근력이 뼈로 전달되는 과정에서 근육에 걸린 장력과 힘줄에 걸린 장력이 매우 짧은 시간 동안 평형을 이룬다고 가정하는데, 이를 근육-힘줄 평형(muscle-tendon equilibrium)이라 일컫는다. 근육-힘줄 평형에는 이전과 현재 프레임에서의 근육 및 힘줄의 길이, 각각의 장력, 근육활성도 등 다양한 변수들이 복합적으로 작용하는데, 해석적으로는 Figure 10과 같이 주어진 길이에서 근력-길이 곡선과 힘줄 장력-길이 곡선의 교점을 찾는 방식으로 풀이한다[21].

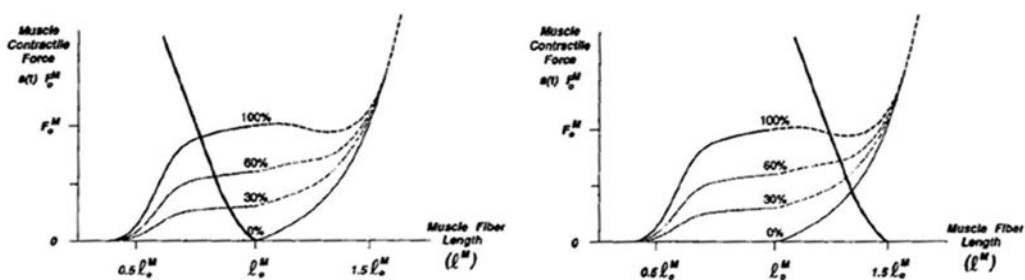


Figure 10 해석적인 근육-힘줄 평형의 풀이 방법 (Yamaguchi, 2001).

RoboticsLab 기반 근육 모델에서는, 이러한 근육-힘줄 평형을 수치적으로 풀이하기 위해 **Figure 11**의 왼쪽 그림과 같이 현재 근육의 길이를 먼저 추정하여 나머지 변수를 계산하고 이를 반복하는 알고리즘으로 힘 평형을 계산한다. 여기에 사용된 힘줄 장력-길이 곡선은 근육과 동일하게 S. L. Delp의 1990년 논문을 기반으로 하였으며, 이를 **Figure 11**의 오른쪽 그림에 나타내었다[23].

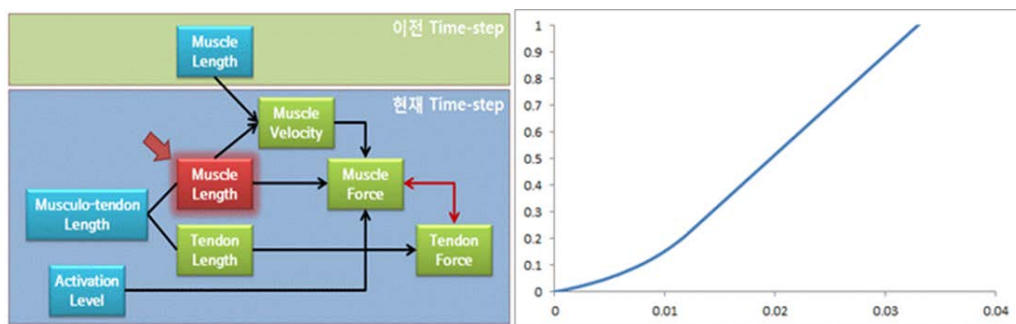


Figure 11 근육-힘줄 평형 알고리즘(좌) 및 힘줄 장력-길이 곡선(우).

인체 근골격 동역학 시뮬레이션에 있어 근육의 생리학적 특성이 근력 발생 원리를 의미한다면, 근육의 해부학적 특성은 근섬유의 경로를 의미한다고 할 수 있다. 기존의 인체 근골격 시뮬레이터들은 근육의 경로를 구현하기 위해 크게 경유점 방식(via-point method)과 장애물 방식(obstacle-set method)의 두 가지를 사용하고 있다. 경유점 방식에서는 시작점에서부터 끝점에 이르기까지 근섬유가 지나는 모든 근육 부착점들의 좌표를 지정하는 반면, 장애물 방식에서는 근육 경로 상에 장애물을 설정하여 근섬유가 이를 돌아가도록 한다[1].

RoboticsLab 기반 근육 모델에서는 근육 경로의 구현을 위해 경유점 방식을 사용하였으며, 근육 부착점들의 부착 바디와 해당 바디 좌표계에서의 상대 좌표 값을 각 근육의 특성 값을 저장하는 *.dml에서 지정할 수 있도록 하였다.

이러한 방식을 이용하여 상완 이두근(Biceps Long Head)의 모델을 실제로 구현한 결과가 **Figure 12**와 같다. 장애물 방식은 RoboticsLab의 기술적인 한계로 인해 구현하지 않았으며, 이를 보완하기 위해 특정 관절의 각도에 따라 특정 경유점을 활성화, 혹은 비활성화 시킬 수 있는 조건부 경유점(conditional via-point) 기능을 추가하였고, 경유점의 활성화를 결정하는 관절각의 범위도 *.dml에서 지정할 수 있다.

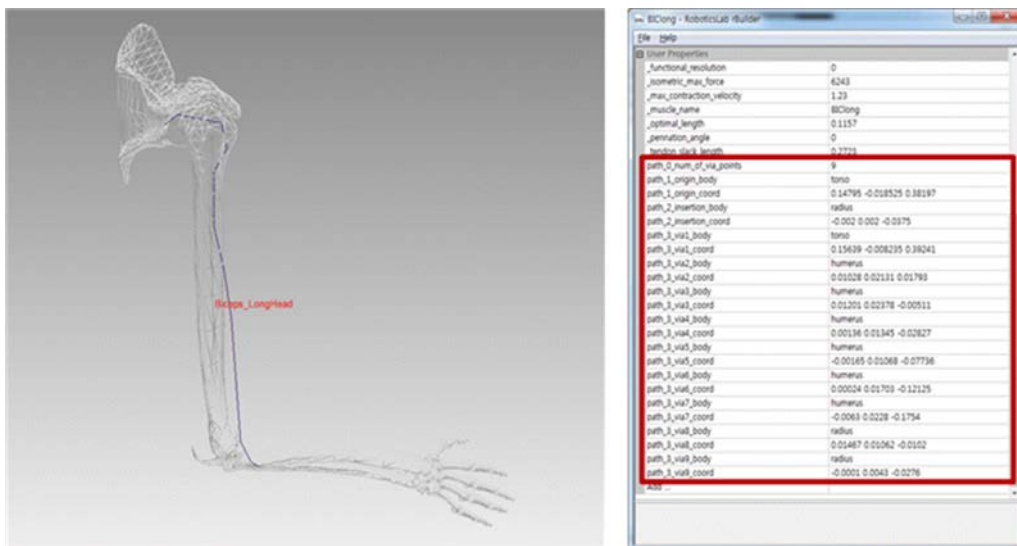


Figure 12 구현된 상완 이두근 모델(좌) 및 해당 *.dml 파일 구조(우).

2.3 근육 모델의 적용

*.dml 형식으로 만들어진 근육 모델은 RoboticsLab의 rBuilder 상에서 인체 모델에 적용시킬 수 있다. rBuilder는 RoboticsLab에서 모델을 만드는 도구로서, **Figure 13**과 같이 크게 모델 패널과 다이어그램 패널의 두 파트로 나뉘어져 있다. rBuilder의 다이어그램 패널에서 관절로 연결된 골격계의 트리 구조를 쉽게

확인할 수 있으며, 시스템 좌표계에 고정된 베이스 바디를 선택하면 특성 창에서 바디 디바이스로 정의된 근육의 목록을 확인하고 편집할 수 있다.

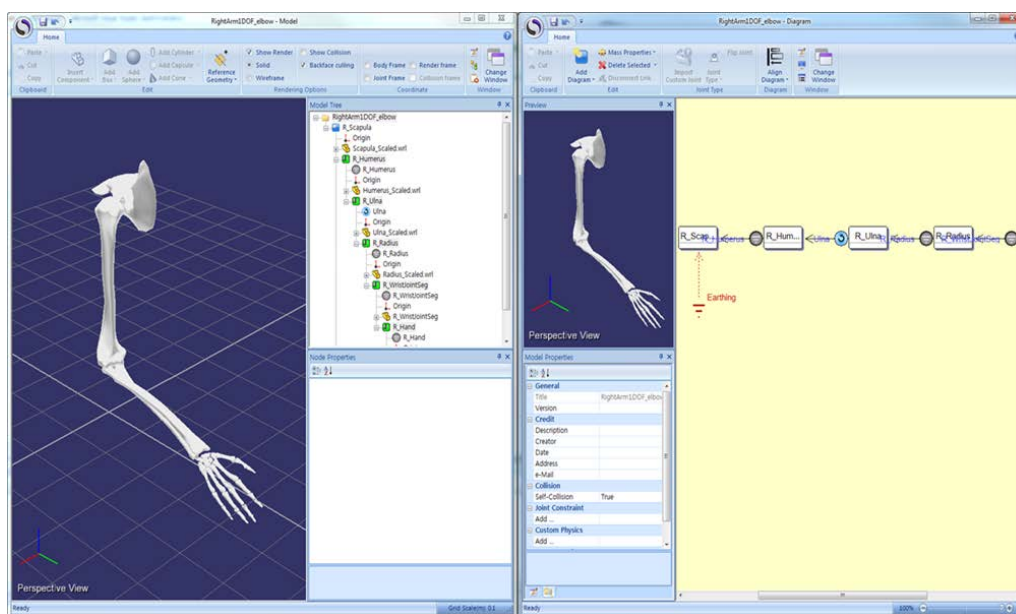


Figure 13 RoboticsLab 기반 인체 근골격 모델의 실행 화면.

Figure 14의 왼쪽과 같이, 최적 힘(optimal force), 최적 길이(optimal length), 우모각(pennation angle), 최대 수축 속도(maximal contraction velocity), 힘줄 여유 길이(tendon-slack length) 등 모든 근육 특성 값은 *.dml 형태의 근육 디바이스에 각각 저장된다. 인체 모델에 필요한 각각의 근육을 모두 *.dml 근육 디바이스로 만든 후 rBuilder를 통해 인체 골격 모델에 적용시키면, Figure 14의 오른쪽 그림과 같이 RoboticsLab을 통해 원하는 인체 근골격 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

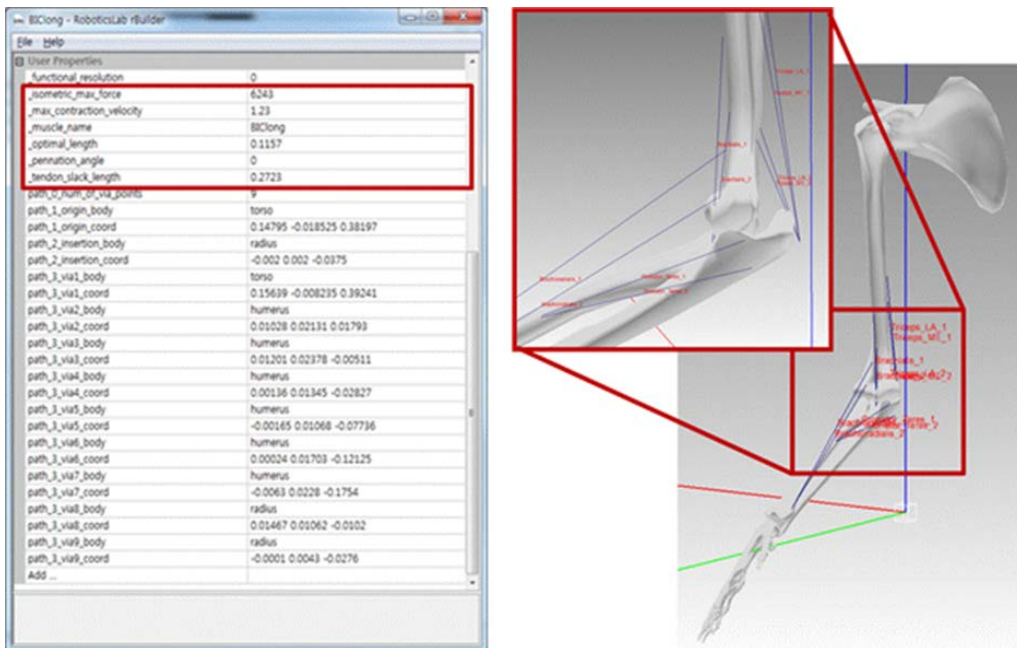


Figure 14 RoboticsLab 기반 근육 모델(좌) 및 이를 포함한 인체 모델의 예(우).

제 3 장 근육 모델의 해상도

다중해상도 근육 모델의 개념이 정립되기 위해서는, 먼저 인체 근육 모델에서의 ‘해상도(resolution)’가 무엇을 뜻하는지 정의되어야 한다. 다시 말해 어떤 요소를 기준으로 근육 모델의 상세 수준을 변경시킬 것인지 결정해야 하는데, 근육은 생리학적 특성, 해부학적 특성 등 다차원적인 특성을 포함하고 있기 때문에 단순히 일차원적인 해상도 개념으로는 근육 모델의 복잡도를 설명할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 근육 모델에 대해 다음 두 가지 차원의 해상도를 도입하였다.

- ① 기능적 해상도(functional resolution)
- ② 구조적 해상도(structural resolution)

3.1 기능적 해상도

앞서 설명한 것처럼, 현재 인체 근골격 동역학 시뮬레이션에 사용되는 근육 모델들은 대부분 A. V. Hill이 제안한 3-요소 모델을 기반으로 근력을 계산한다. 3-요소 모델은 근육을 수축요소, 탄성체, 감쇄기 등으로 간략화하여, 비선형적으로 정의된 수식과 알고리즘을 통해 근력-길이-속도 상관관계 등 근육의 거시적인 특성을 반영한다[19]. 여기에 힘줄이 더해진 모델은 현재까지도 여러 시뮬레이터에서 많은 연구자들에 의해 사용되고 있다[20-22].

한편, 시뮬레이터에 따라서는 3-요소 근육 모델보다 조금 더 복잡한, 혹은 덜 복잡한 수식이나 알고리즘을 포함하는 모델을 제공하기도 한다. 예를 들어 AnyBody Modeling System은 3-요소 근육 모델을 의미하는 ‘AnyMuscleModel3E’ 외에도, 수축요소와 직렬 탄성체만을 포함하는 ‘AnyMuscleModel2ELin’, 근력이

간단히 근육활성도에 의해서만 결정되는 ‘AnyMuscleModel’ 등의 근육 모델 클래스를 제공하고 있다. 다시 말해 3-요소 모델이 대다수 동역학 근육 모델의 기반이 되기는 하지만, 목적에 따라 더 복잡한, 혹은 덜 복잡한 근력 계산 수식 및 알고리즘을 사용할 수 있는 것이다.

이러한 점에서, 본 연구에서는 근육 모델의 기능적 해상도를 ‘해당 근육 모델이 얼마나 복잡한 알고리즘 또는 수식을 통해 근력을 계산하는지에 대한 해상도’로 정의하였다. 기능적 해상도는 근육의 3차원 형상이나 경로에 관계 없이 근력 계산에만 영향을 미치기 때문에 근육의 내적·생리학적 특성을 반영한다고 할 수 있다.

3.2 구조적 해상도

하나의 근육은 수많은 근섬유들의 집합이며, 각 근섬유들은 서로 다른 작용점에 서로 다른 근력을 작용한다[20,24-25]. 따라서 각각의 근섬유를 인체 운동에 대한 독립적인 구동기로 생각할 수 있으며, 이상적으로는 근섬유 하나하나가 별개의 근육 모델로 모델링 되어야 한다.

그러나 현재 사용되는 대부분의 근육 모델들은 근육을 근섬유가 아닌 큰 덩어리 단위로 분리하여 얻은 데이터를 기반으로 하기 때문에, 인체 모델마다 근육 모델의 수는 물론, 그 구성과 배열이 제각각 다르다. 예를 들어 고관절 측면에 있는 중둔근(Gluteus Medius)은 **Figure 15**의 왼쪽 그림처럼 매우 많은 근섬유들이 부채꼴 모양으로 분포된 근육이다[26]. 그러나 **Figure 15**의 가운데 그림에서 볼 수 있듯이 OpenSim의 기본 보행 모델인 ‘Gait2354’에는 중둔근이 근육 모델 3개로 모델링 되어 있으며[23,27-29], 오른쪽 그림과 같이 AnyBody

Modeling System의 보행 모델 ‘GaitFullBody’에는 앞쪽과 뒤쪽 각 6개씩, 총 12개로 모델링 되어 있다.

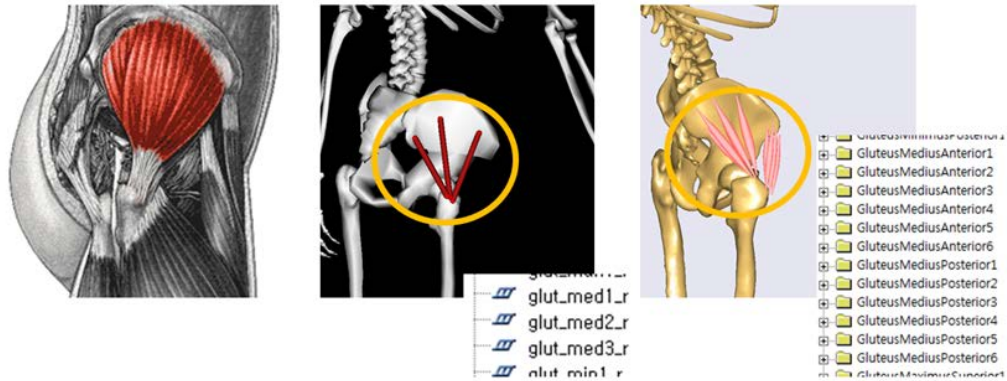


Figure 15 중둔근의 실제 형상(좌) 및 OpenSim(중), AMS(우)에서의 중둔근 모델.

이러한 점에서, 본 연구에서는 근육 모델의 구조적 해상도를 ‘해당 근육을 얼마나 많은 수의 근육 모델로, 어떤 구성 및 배열로 모델링 할지에 대한 해상도’로 정의하였다. 구조적 해상도는 기능적 해상도와는 반대로 근섬유가 지나가는 경로에만 관계되기 때문에, 근육의 외적·해부학적 특성에 해당된다고 할 수 있다.

제 4 장 다중해상도 근육 모델과 해상도 변화

이렇게 정립된 근육 모델 해상도의 개념으로부터 다음과 같이 ‘다중해상도 근육 모델(multi-resolutional muscle model)’을 정의할 수 있다. 다중해상도 근육 모델이란, 근육 모델의 기능적·구조적 해상도 측면에서, 해석 목적과 조건에 따라 하나의 모델이 여러 해상도의 모델로서 동작할 수 있는 근육 모델을 의미한다.

그런데 이러한 다중해상도 개념이 실제적인 의미를 가지려면, ‘해상도 변화(resolution change)’ 알고리즘이 정립되어야 한다[15-16]. 해상도 변화 알고리즘이란, 하나의 모델에서 서로 다른 해상도에서의 데이터, 연산, 해석을 얻어낼 수 있는 방법을 의미한다. 다중해상도 솔리드 모델에 대해서도 해상도 변화 알고리즘에 관한 다수의 연구가 이루어져왔는데, 일반적으로 최상위 해상도에서의 정보만을 저장하고 있으면서 필요에 따라 저해상도의 정보를 만들어 낼 수 있는 것이 가장 이상적인 형태라 할 수 있다. 본 연구에서도 다중해상도 근육 모델의 기능적·구조적 해상도에 대해 각각 해상도 변화 알고리즘을 구성하였다.

4.1 기능적 해상도 변화

앞서 정의한대로, 근육 모델의 기능적 해상도는 해당 근육 모델이 얼마나 복잡한 알고리즘 또는 수식을 통해 근력을 계산하는지를 의미한다. 따라서 해상도가 높아질수록 필연적으로 근력 계산에 필요한 근육 특성 변수가 많아지게 된다. **Figure 16**은 다양한 해상도 레벨의 근력 계산 알고리즘과 이에 필요한 근육 특성 변수의 예를 보여주는데, 왼쪽의 각 알고리즘을 위해 필요한 근육

특성 변수를 오른쪽에 같은 색 사각형으로 표시하였다. 예를 들어 남색으로 표시된 것처럼 근육을 이상적인 장력 발생기로 가정하면 해당 근육의 최적 힘(optimal force)만이 근력 계산에 필요하지만, 보라색과 같이 근력-길이-속도 상관관계 및 근육-힘줄 평형을 계산에 포함하고자 하면 해당 근육의 최적 길이(optimal length), 최대 수축 속도(maximal contraction velocity), 우모각(pennation angle), 힘줄 여유 길이(tendon-slack length) 등이 추가로 필요하게 된다[20].

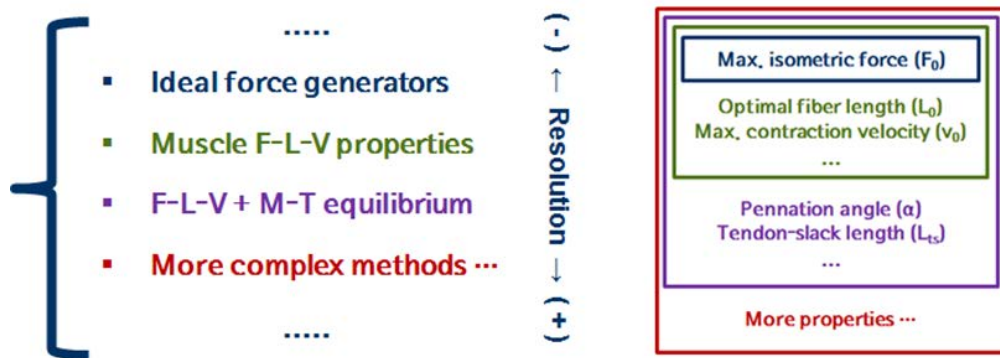


Figure 16 다양한 해상도의 근력 계산 알고리즘(좌) 및 근육 특성 변수(우).

이러한 이유에서, 근육 모델의 기능적 해상도 변화는 근육 모델에 저장된 근육 특성 변수의 선별적 사용을 통해 가능해질 수 있다. 지정된 해상도에 따라 시뮬레이터가 필요한 근육 특성 변수만을 근력 계산에 사용함으로써 근육 모델의 해상도 변화가 자동적으로 수행되며, 이를 위해서는 근력 계산 알고리즘을 모두 시뮬레이터에 내재시키고 근육 모델에는 가장 높은 해상도에서 필요한 모든 근육 특성 변수 값을 저장하면 된다.

이러한 원리를 적용하여, 앞서 설명했던 RoboticsLab 기반 동역학 근육 모델에 기능적 해상도 변화 기능을 실제로 구현한 것이 **Figure 17**과 같다. 이 근육

모델은 기능적 해상도 레벨을 나타내는 ‘_functional_resolution’ 값에 따라 다양한 알고리즘으로 근력을 계산하며, 이 과정에서 모델에 저장된 여러 근육 특성 변수 중 현재 해상도에서 근력 계산에 필요한 변수만 선별적으로 사용한다. 이를 **Figure 16**에서와 같은 색 사각형으로 표시하였다.

User Properties	
functional_resolution	0
_isometric_max_force	6243
_max_contraction_velocity	1.23
_muscle_name	BIClong
_optimal_length	0.1157
_pennation_angle	0
_tendon_slack_length	0.2723
path_0_num_of_via_points	9
path_1_origin_body	torso
path_1_origin_coord	0.14795 -0.018525 0.38197
path_2_insertion_body	radius
path_2_insertion_coord	-0.002 0.002 -0.0375
path_3_via1_body	torso
path_3_via1_coord	0.15639 -0.008235 0.39241
path_3_via2_body	humerus
path_3_via2_coord	0.01028 0.02131 0.01793
path_3_via3_body	humerus

Figure 17 RoboticsLab 기반 근육 모델에 구현된 기능적 해상도 변화 기능.

4.2 구조적 해상도 변화

한편, 앞서 구조적 해상도는 해당 근육을 얼마나 많은 수의 근육 모델로, 어떤 구성 및 배열로 모델링 하는지로 정의했다. 이 정의와 상기한 가장 이상적인 해상도 변화 형태를 고려할 때, 구조적 해상도 변화란 결국 **Figure 18**과 같이 많은 수의 근육 모델 경로 정보를 가지고 있을 때 이로부터 원하는 수의

근육 모델 경로를 얻어내는 것을 의미한다. 이를 위해서는 많은 근육 모델 중 어떤 것들이 하나로 묶여야 하는지를 결정해야 하며, 이는 근육 모델들 간의 군집화(clustering) 문제가 된다.

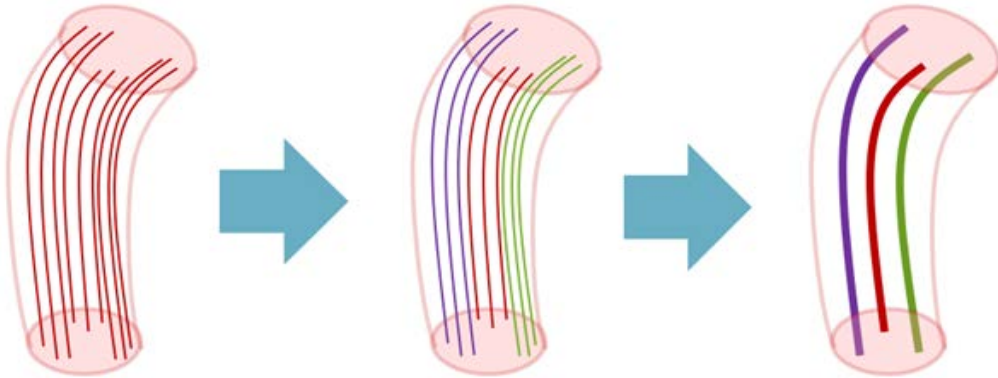


Figure 18 군집화를 통한 근육 모델의 구조적 해상도 변화 과정 모식도.

군집화 알고리즘이란 주어진 데이터들 중 비슷한 것들을 묶어 원하는 수의 군집으로 집단화하는 분석 기법을 뜻하며, 현재까지 분류 원리에 따라 중심점 기반 군집화, 분포 기반 군집화, 밀도 기반 군집화 등 다양한 방식 제안되었다 [30-31]. 본 연구에서는 근육 모델 간의 군집화 알고리즘으로 계층적 군집화 (hierarchical clustering) 방식을 사용하였다. 계층적 군집화 알고리즘에서는 주어진 데이터 사이에 계층적인 구조가 있다고 가정하여, 데이터들의 연결 관계를 기준으로 계통도(dendrogram)를 구성하고 이를 이용하여 군집화를 수행한다 [32]. **Figure 19**와 같이 실제 근육이 하나의 근육에서부터 근섬유다발(fascicle), 근섬유(muscle fiber), 근원섬유(myofibril) 등으로 이어지는 매우 계층적 구조를 가지고 있음을 고려할 때[25], 계층적 군집화 방식은 근육 모델의 군집화에 매우 적합한 알고리즘이라 할 수 있다.

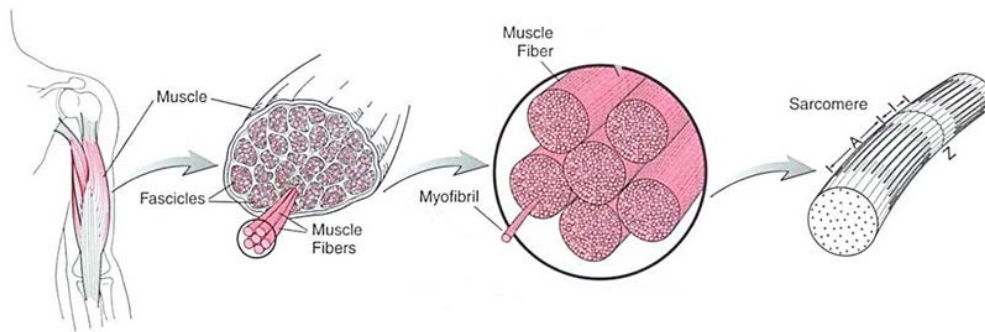


Figure 19 실제 근육의 계층적 구조 (Lieber, 2009)

근육 모델의 구조적 해상도 변화를 실제 근육 모델에 적용한 결과가 **Figure 20**부터 **Figure 22**에 나타나 있다. **Figure 20**의 왼쪽 그림은 AnyBody Modeling System의 ‘GaitFullBody’ 모델 중 우측 삼각근(Deltoid)의 경로를 MATLAB[33] (MathWorks Inc., USA)으로 3차원 시각화한 것이다. 이 근육 모델 경로에 계층적 군집화를 적용하면 **Figure 21**과 같은 계통도를 얻을 수 있는데, 그래프에서 x-축은 12개의 근육 모델을, y-축은 각 그룹 간의 거리를 나타낸다. 이 계통도를 이용하면 **Figure 20**의 가운데 그림과 같이 12개 근육 모델을 6개의 집단으로 군집화할 수 있으며, 각 군집을 각각 하나의 근육 모델 경로로 치환하면 오른쪽 그림과 같은 6개의 새로운 근육 모델 경로를 얻을 수 있다.

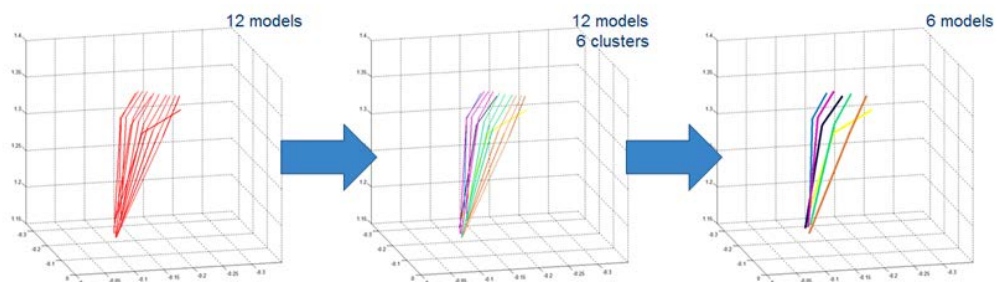


Figure 20 우측 삼각근 모델의 구조적 해상도 변화 과정

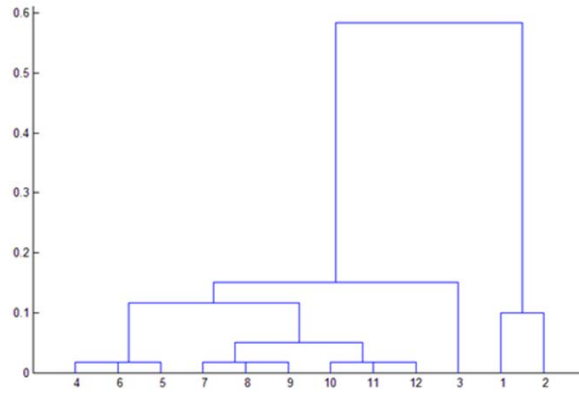


Figure 21 우측 삼각근 모델의 계통도 (pdist: Spearman)

이 과정을 골격 모델과 함께 살펴보면, **Figure 22**와 같이 근육 모델의 해부학적 복잡도, 즉 구조적 해상도가 감소한 것을 좀 더 명확히 확인할 수 있다.

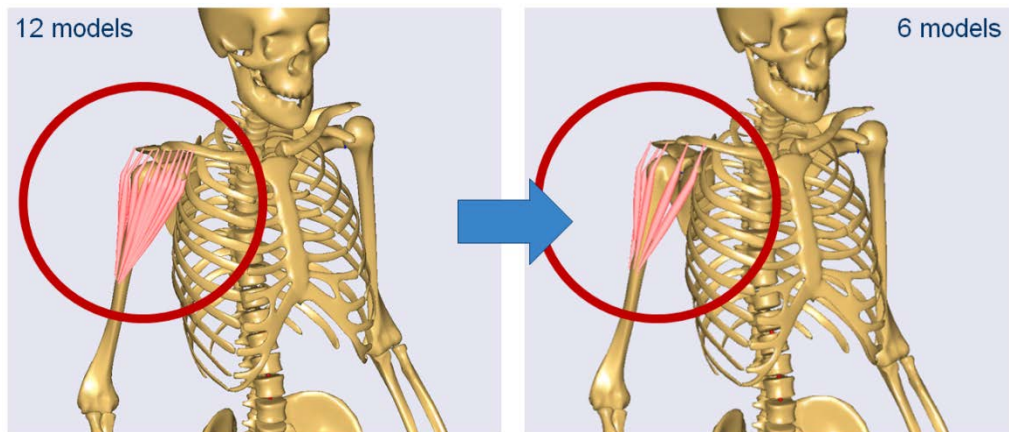


Figure 22 우측 삼각근 모델의 구조적 해상도 변화

동일한 과정을 같은 인체 모델의 우측 대내전근(Adductor Magnus)과 우측 중둔근(Gluteus Medius)에 적용한 결과가 각각 **Figure 23**, **Figure 24**와 같다.

Figure 23의 우측 대내전근의 경우, 13개 근육 모델을 5개 모델로 줄여 구조적 해상도를 변화시켰다.

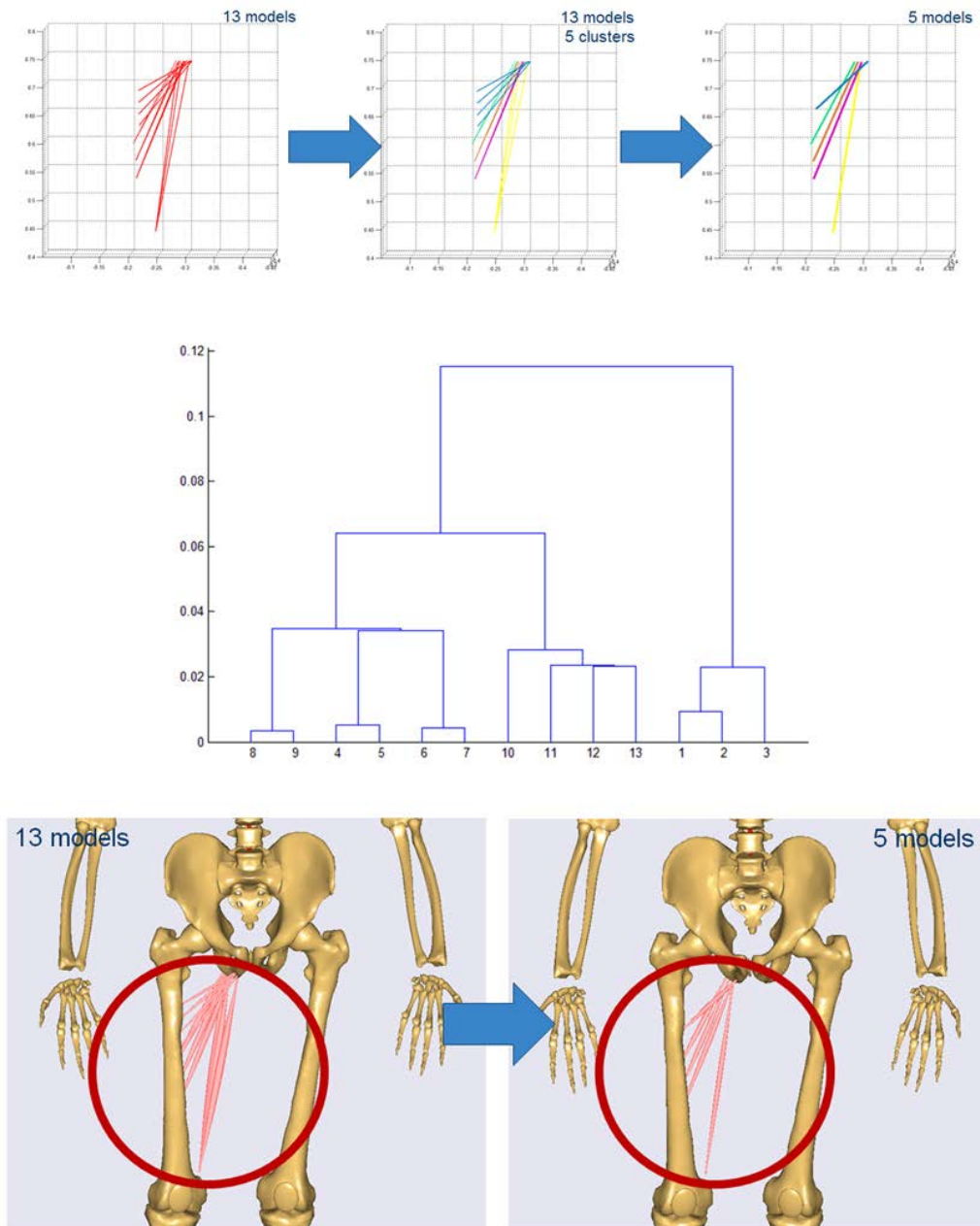


Figure 23 우측 대내전근 모델의 구조적 해상도 변화 과정 (pdist: Euclidean)

Figure 24에 나타난 우측 중둔근의 경우, 12개 모델을 6개 모델로 줄여 구조적 해상도를 변화시켰다.

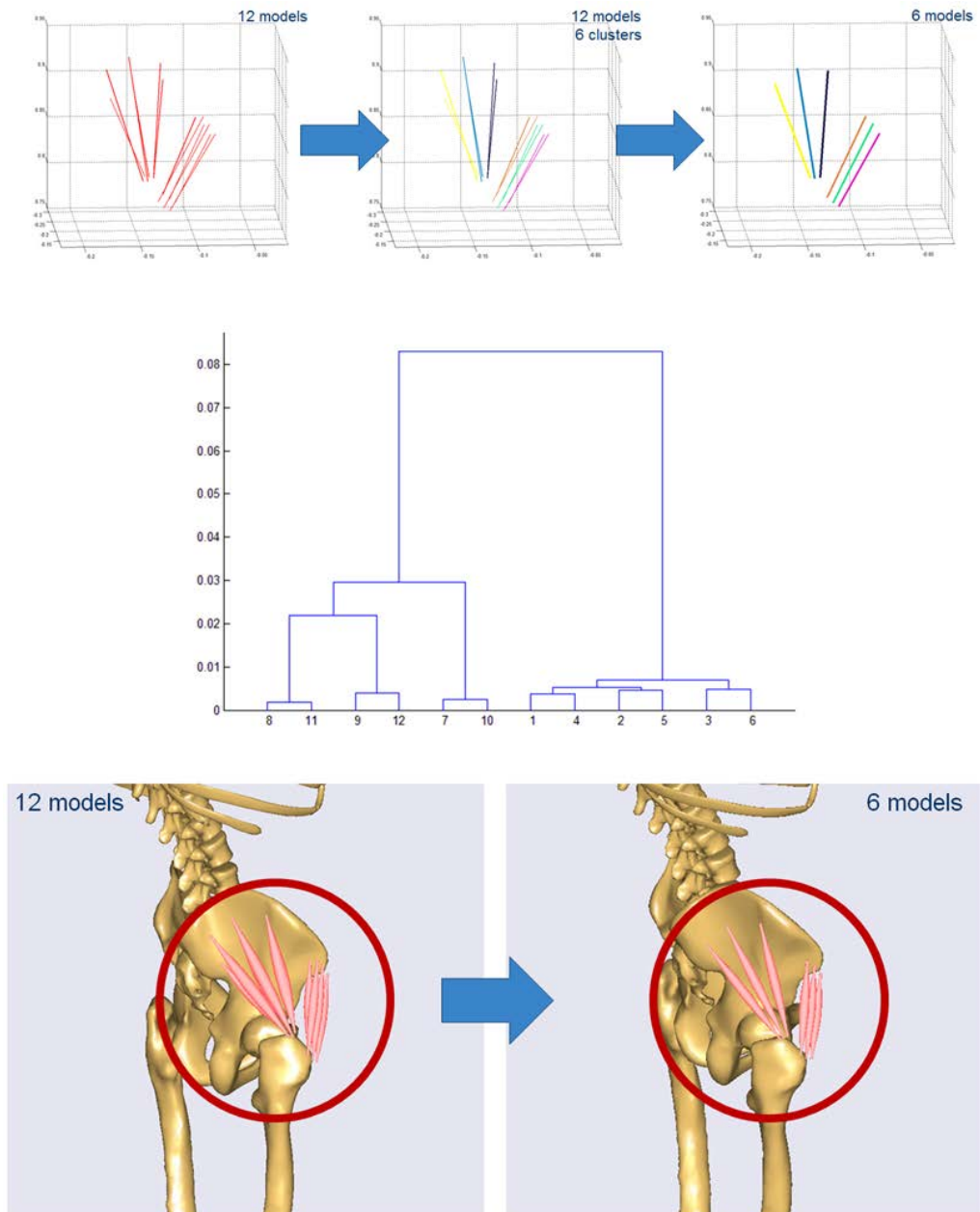


Figure 24 우측 중둔근 모델의 구조적 해상도 변화 과정 (pdist: Cosine)

4.3 더 높은 해상도로의 확장

다중해상도 근육 모델의 개념이 다중해상도 CAD 모델로부터 파생된 것은 사실이지만 둘 사이에는 분명한 차이점이 존재하는데, 대표적인 것이 더 높은 해상도로의 확장 가능성이다. 다중해상도 CAD 모델의 경우 가장 높은 해상도에서의 모델이 가장 정밀하고 변하지 않는 모델인 반면, 다중해상도 근육 모델에서는 향후 이용 가능한 데이터가 늘어날수록 더 높은 해상도의 모델이 가능해진다. 따라서 다중해상도 근육 모델은 더 높은 해상도로의 확장성을 가져야 하며, 이렇게 추가된 데이터는 기존 해상도 체계와 유기적으로 연결되어야 한다.

본 연구에서 제안한 근육의 기능적·구조적 해상도에서도 이러한 확장성을 고려하였다. 먼저 기능적 해상도의 경우, 근육 모델에는 근력 계산에 필요한 근육 특성 변수들만이 저장되기 때문에 필요한 변수만 새로 추가하면 쉽게 더 높은 해상도로의 확장이 가능하다. 구조적 해상도의 경우, 더 높은 해상도의 데이터가 추가될 때 완전히 새로운 계통도가 만들어지는 것이 아니고, 근육의 계층적 구조에 의해 기존 계통도에서 하위 가지가 늘어나는 형태가 된다. 따라서 계통도를 매개로 하여 기존의 해상도 체계를 흐트러트리지 않으면서 유기적으로 해상도가 확장될 수 있다.

제 5 장 다중해상도 근육 모델의 활용

5.1 인체 시뮬레이션의 효율성 증대

다중해상도 근육 모델의 가장 기본적인 활용 방법은 중요도에 따라 근육의 해상도를 달리하여 인체 근골격 동역학 시뮬레이션의 효율성을 증대시키는 것이다. 다중해상도 근육 모델을 사용하면 각 근육 모델이 각자의 해상도를 가지기 때문에 하나의 인체 모델, 하나의 시뮬레이션 안에 여러 해상도의 근육 모델이 혼재할 수 있다. 따라서 해석 목적에 의해 관찰하고자 하는 근육, 해당 동작에서 지배적으로 작동되는 근육 등 상대적으로 더 중요한 근육의 해상도를 높이고 덜 중요한 근육의 해상도를 낮추어, 시뮬레이션의 효율성을 증대시킬 수 있다.

5.2 통합된 근육 모델 시스템 구축

또한 다중해상도 근육 모델 개념을 이용하면 지금까지 축적된, 그리고 향후 축적될 다양한 인체 근육 데이터 및 근력 산출 알고리즘들을 하나로 통합하여 새로운 시스템 체계를 구축하는 것이 가능하다. 지금까지 대부분의 연구자들은 인체 데이터를 제각기 다른 복잡도로 측정하여 제각기 다른 모델로 구성해 왔으며, 이 때문에 서로 다른 인체 모델로 해석한 결과들 사이에 연계성이 매우 떨어졌다. 만약 다중해상도 근육 모델에 다양한 복잡도로 측정된 근육 데이터들을 모두 담아낼 수 있다면, 다양한 근육 데이터, 나아가 다양한 인체 해석 결과들 간의 유기적인 연계성을 기대할 수 있다.

제 6 장 결론 및 논의

CAD 본 연구에서는 동역학 근육 모델에 다중해상도 개념을 도입하여, 인체 근골격 동역학 시뮬레이션을 위한 다중해상도 근육 모델을 제안하였다. 이를 위해 근육 모델의 해상도를 기능적 해상도와 구조적 해상도의 두 가지 차원으로 정의하였고, 각각에 대한 해상도 변화 알고리즘도 논의하였다. 이러한 다중해상도 근육 모델을 활용하면 인체 시뮬레이션의 효율성을 증대시킬 수 있는 것은 물론, 지금까지 제각기 축적되었던 다양한 인체 근육 데이터 및 근력 산출 알고리즘들의 컨테이너 체계를 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

물론 현 시점에서 다중해상도 근육 모델 개념을 매우 완벽한 시스템으로 보기는 힘들다. 현재 수준의 인체 근육 데이터로는 다중해상도 근육 모델의 유효성을 정량적으로 검증하기가 어렵고, 향후 추가될 새로운 데이터와 알고리즘들이 이 시스템에 적합하지 않을 가능성도 있다. 따라서 데이터가 누적될수록 시스템에 대한 지속적인 검증, 수정 및 개선이 필요하다.

그러나 본 연구는 솔리드 모델에서의 해상도 개념을 근육 모델에 적용하여, 근육 모델의 복잡도를 체계적으로 조절하는 초기 모델을 제안했다는 점에서 의의가 크다. 또한 시스템이 더 구체화되면, 다양한 근육 데이터와 근력 산출 알고리즘들을 하나의 체계로 구성하여 여러 인체 해석 결과들 간의 유기적인 연계성을 도모할 수 있을 것이다. 이러한 점에서 본 연구는 향후 다양한 인체 데이터와 알고리즘이 통합된 ‘표준 근육 모델’의 개발에 초석이 될 것으로 기대된다.

Bibliography

- [1] Pandy, M. G., Computer Modeling and Simulation of Human Movement, *Annual Review of Biomedical Engineering* 3, 2001.
- [2] Erdemir, A. et al., Model-based Estimation of Muscle Forces Exerted during Movements, *Clinical Biomechanics* 22(2), 2007.
- [3] SantosHuman, SantosHuman Inc., USA. (<http://www.santoshumaninc.com/>)
- [4] AnyBody Modeling System, AnyBody Technology, Denmark. (<http://www.anybodytech.com/>)
- [5] Damsgaard, M. et al., Analysis of Musculoskeletal Systems in the AnyBody Modeling System, *Simulation Modeling Practice and Theory* 14(8), 2006.
- [6] OpenSim, Stanford University, USA. (<http://opensim.stanford.edu/>)
- [7] Delp, S. L. et al., OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54(11), 2007.
- [8] SIMM, MusculoGraphics Inc., USA. (<http://www.musculographics.com/>)
- [9] Delp, S. L.; Loan, J. P., A Graphics-based Software System to Develop and Analyze Models of Musculoskeletal Structures, *Computers in Biology and Medicine* 25(1), 1995.
- [10] LifeMOD, LifeModeler Inc., USA. (<http://www.lifemodeler.com/>)
- [11] Audu, M. L.; Davy, D. T., The Influence of Muscle Model Complexity in Musculoskeletal Motion Modeling, *Journal of Biomechanical Engineering* 107(2), 1985.

- [12] Pandy, M. G. et al., An Optimal Control Model for Maximum-height Human Jumping, *Journal of Biomechanics* 23(12), 1990.
- [13] Blajer, W. et al., Influence of Selected Modeling and Computational Issues on Muscle Force Estimates, *Multibody System Dynamics* 24(4), 2010.
- [14] Holmberg, L. J.; Klarbring, A., Muscle Decomposition and Recruitment Criteria Influence Muscle Force Estimates, *Multibody System Dynamics* 28(3), 2012.
- [15] Lee, S. H., Feature-Based Multiresolution Modeling of Solids, *ACM Transactions on Graphics* 24(4), 2005.
- [16] Lee, S. H.; Lee, K., Feature-based Multiresolution Techniques for Product Design, *Journal of Zhejiang University: Science* 7(9), 2006.
- [17] RoboticsLab, SimLab Co. Ltd., Korea. (<http://www.simlab.co.kr/>)
- [18] 박종훈 외 3인, ERoboticsLab의 시뮬레이션 엔진 및 프레임워크, *한국로봇 학회지* 7(2), 2007.
- [19] Hill, A. V., The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle, *Proceedings of the Royal Society B* 126, 1938.
- [20] Zajac, F. E., Muscle and Tendon: Properties, Models, Scaling, and Application to Biomechanics and Motor Control, *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 17(4), 1989.
- [21] Yamaguchi, G. T., Dynamic Modeling of Musculoskeletal Motion - A Vectorized Approach for Biomechanical Analysis in Three Dimensions, 2001.
- [22] Winter, D. A., *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 2009.
- [23] Delp, S. L. et al., An Interactive Graphics-Based Model of the Lower Extremity to Study Orthopaedic Surgical Procedures, *IEEE Transactions on Biomedical*

Engineering 37(8), 1990.

- [24] McMahon, T. A., *Muscles, Reflexes, and Locomotion*, 1984.
- [25] Lieber, R. L., *Skeletal Muscle Structure, Function and Plasticity – The Physiological Basis of Rehabilitation*, 2009.
- [26] Netter, F. H., *Atlas of Human Anatomy*, 1997.
- [27] Yamaguchi, G. T.; Zajac, F. E., A Planar Model of the Knee Joint to Characterize the Knee Extensor Mechanism, *Journal of Biomechanics* 22(1), 1989.
- [28] Anderson, F. C.; Pandy, M. G., A Dynamic Optimization Solution for Vertical Jumping in Three Dimensions, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 2(3), 1999.
- [29] Anderson, F. C.; Pandy, M. G., Dynamic Optimization of Human Walking, *Journal of Biomechanical Engineering* 123(5), 2001.
- [30] Xu, R.; Wunsch, D. C. II, Survey of Clustering Algorithms, *IEEE Transactions on Neural Networks* 16(3), 2005.
- [31] P. Berkhin, A Survey of Clustering Data Mining Techniques, *Grouping Multidimensional Data*, 2006.
- [32] Lance, G. N.; Williams, W. T., A General Theory of Classificatory Sorting Strategies: Hierarchical Systems, *The Computer Journal* 9(4), 1967.
- [33] MATLAB, MathWorks Inc., USA. (<http://www.mathworks.com/>)

Abstract

Multi-resolutional Muscle Model for Human Musculoskeletal Dynamic Simulations

Sangjun Lee

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

College of Engineering

Seoul National University

Recently, with the improvement of measurement techniques, dynamic human models which include highly sophisticated muscle models have been developed. In this trend, the demand for controlling the complexity of muscle models depending on the purpose of the simulation has increased. However, there is no previous study concerning the algorithm for systematically manipulating the complexity of a muscle model. In this reason, this study proposes the 'multi-resolutional muscle model' by introducing the 'multi-resolution' concept into dynamic muscle models for human musculoskeletal simulations. The resolution of a muscle model is defined into two different dimensions, the functional resolution and the structural resolution. Also, in order to make the multi-resolution concept more meaningful, resolution change algorithms for each type are discussed. Although this model needs further modification and improvement, this study can be a cornerstone of the integration of various muscle models in the future.

Keywords: Musculoskeletal simulation, Muscle model, Multi-resolution, Biomechanics

Student ID: 2011-20734