

켈레조화함수를 이용한 비순차적 의류 주름 모사 알고리즘

(A Non-consecutive Cloth Draping Simulation Algorithm using Conjugate Harmonic Functions)

강 문 구 ^{*}

(Moon Koo Kang)

요 약 본 논문에서는 컴퓨터그래픽으로 구현된 인체에 착용되는 의류의 시뮬레이션을 위한 수치해석 알고리즘 및 소프트웨어 개발을 수행하였다. 개발된 알고리즘은 수학적으로 elliptical 혹은 비순차적인 성질을 가지는 두 개의 켈레조화함수(conjugate harmonic functions)들을 사용하여, 지나간 시간단계(time step)에서의 결과에 의존하지 않고 매 순간의 역학적 균형만으로 의류에 형성되는 주름의 형태를 표현한다. Global-local 해석기법을 채택하여 global 스케일에서의 전체적인 변형과 local 스케일에서의 부분적인 변형으로 나누었으며, 이 두 가지 스케일에서의 해석 결과가 선형적으로 중첩될 수 있음을 가정하였다. Global 해석에서는 신체 각 부위의 회전이나 평행이동, 뒤틀림 등의 전반적인 변형에 따른 인체와의 접촉점의 변화와 응력을 고려하였다. Local 해석에서는 국소적인 주름의 형상을 얻기 위해 주름의 진폭등고선과 주름의 방향 사이의 직교성을 가정하여 단순화 시켰다.

본 제안 방법은 불연속적으로 변화하는 두 개의 서로 다른 자세에 대해서도 중간단계 해석을 위한 시간증분의 삽입이 불필요하며, 기존의 방식에서 주로 사용되는 시간적분의 방법을 채택하지 않으므로 연산 시간의 절감과 안정성의 향상이 이루어졌다. 임의의 두 자세 사이의 연속 동작을 시뮬레이션 함에 있어서도 두 정지 자세 사이의 움직임은 보간법으로 구현하여 연속적인 의류의 변형을 구현할 수 있었다.

키워드 : 의류 시뮬레이션, global-local 해석, 비순차적 해석, 켈레조화함수

Abstract This article describes a simplified mathematical model and the relevant numerical algorithm to simulate the draped cloth on virtual human body. The proposed algorithm incorporates an elliptical, or non-consecutive, method to simulate the cloth wrinkles on moving bodies without resorting to the result of the past time-steps of drape simulation. A global-local analysis technique was employed to decompose the drape of cloths into the global deformation and the local wrinkles that will be superposed linearly. The global deformation is determined directly by the rotation and the translation of body parts to generate a wrinkle-free yet globally deformed shape of cloth. The local wrinkles are calculated by solving simple elliptical equations based on the orthogonality between conjugate harmonic functions representing the wrinkle amplitude and the direction of wrinkles.

The proposed method requires no interpolative time frames even for discontinuous body postures. Standing away from the incremental approach of time integration in conventional methods, the proposed method yields a remarkable reduction of CPU time and an enhanced stability. Also, the transient motion of cloth could be achieved by interpolating between the deformations corresponding to each static posture.

Key words : cloth draping simulation, global-local analysis, non-consecutive analysis, conjugate harmonic functions

1. 서론

컴퓨터그래픽 기법을 통해 제작된 인간의 모습은 착용하고 있는 옷의 형태에 따라 그 사실감이 크게 차이가 난다. 사람의 몸의 대부분의 표면적은 옷으로 덮여 있으므로 주름과 구겨짐 등이 현실적으로 잘 표현된 옷

^{*} 정 회 원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
moonkang@ee.snu.ac.kr

논문접수 : 2004년 6월 3일
심사완료 : 2005년 1월 20일

은 사실감을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 최근 애니메이션, 가상현실, 영화의 특수효과 등에서 자주 사용되는 가상 인간 및 캐릭터 등의 움직임은 그래픽적으로 표현함에 있어 신속하고 안정성 높은 의류 시뮬레이션 기술에 대한 요구가 크게 증가하고 있다. 특히 실시간 시뮬레이션 등의 적용분야에서는 연산의 신속성과 안정성이 더욱 중요하게 인식되고 있다. 우수한 의류 시뮬레이션 알고리즘은 가능한 빠른 CPU time 내에 필요한 결과물을 산출할 수 있어야 하며, 급격히 이루어지는 인체의 자세 변화에 대해서도 충분한 안정성을 보유했을 수 있도록 제작되어야 한다.

인체에 착용된 의류의 변형 및 주름과 구김현상을 시뮬레이션 하기 위해 다양한 종류의 해석기법들이 개발된 바 있다. Weill[1] 등은 현수 케이블(catenary cable)의 곡률을 hyperbolic 곡선을 이용하여 근사 시킬 수 있음에 착안하여 옷의 주름을 표현할 수 있는 간단한 기하학적 알고리즘을 제시한 바 있다. Agui[2] 등은 옷이 접히는 부분의 주름을 기하학적으로 표현하는 방법을 제안하였다. Ng와 Grimsdale[3] 등은 접힘 부위와 주름선, 즉 그들이 원래 사용하였던 용어에 따르면 fold function과 profile function은 그 방향성이 서로 연관되어 있음을 증명하였다. 그들은 또한 접힘 부위의 주름의 선들은 주기적 삼각함수의 같은 위상을 가지는 등치선으로 표현될 수 있음을 제안하였다.

Terzopoulos[4] 및 Aono[5] 등은 의류의 주름을 표현하는데 있어 역학적인 평형의 개념을 처음으로 도입하여 물리적으로 해석할 수 있는 기술을 개발하였다. 그들의 연구 결과에 따르면 주름은 옷감의 탄성변형에 따라 발생하는 현상으로서, 미분방정식을 도입하여 해석할 수 있음을 제안하였다. Kuniif[6]와 Taillefer[7] 등은 기하학적 방법과 물리적 역학방정식을 모두 사용하여 의류의 주름을 적절한 진폭과 주기를 가지는 삼각함수의 형태로 단순화시킨 기술을 발표하였다.

Volino, Thalmann[8~10] 등은 의류에 가해지는 다양한 종류의 힘을 분석하여 동역학적 움직임에 대응하는 의류의 운동을 묘사하는 기술을 개발하였다. Breen[11] 등은 의류 각 부분의 유한한 면적을 질량을 가진 입자로 단순화시킨 후 최소에너지법칙(minimum energy principle)을 사용하여 의류의 내부에너지를 최소화시키는 방식으로 힘의 평형을 찾아가는 알고리즘을 제시하였다. Baraff와 Witkin[12] 등은 암시적(implicit) 시간적분 방식을 사용하여 물리적인 힘의 평형 방정식을 해석하였다. Cordier[13] 등은 인체의 피부와 의류의 작용과 반작용의 현상을 고려하여 보다 사실감 높은 의류의 변형을 시뮬레이션 하였다. Meyer[14] 등은 implicit 방식과 explicit 방식을 선택적으로 사용하는

시간적분 기법을 채택하여 보다 빠르고 안정적인 시간적분을 달성하였다. Rudomin[15,16] 등은 인체와 의류의 역학적인 상호작용을 고려하여 여러 겹의 의류가 인체에 착용 되었을 경우의 의류의 변형을 사실적으로 표현하였다. 오승우, 김형석, 원광연[19] 등은 인체와 의류의 충돌해석을 위주로 하여 실시간 구현이 가능한 의류 시뮬레이션 기술을 개발하였다. 최광진, 고희석[21] 등은 큰 시간증분에 대해서도 안정성을 유지할 수 있고 후좌굴(post-buckling)현상에 따른 물리적 불안정성을 극복할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 장미정, 오승우, 원광연[20] 등은 온라인상에서 구현할 수 있는 실시간 의류 가봉 시뮬레이션을 개발하여 의류의 패턴이 신체에 맞게 수정되고 바느질되어 착용되는 과정을 시뮬레이션 하였다.

본 연구에서는 임의의 급격한 자세 변화에 대해 실시간에 대응할 수 있는 고속의 의류 시뮬레이션 알고리즘 개발을 목표로 하였다. 현재까지 발표된 연구 결과에 따르면 역학적인 시뮬레이션 기법을 이용하여 사실적인 의류 시뮬레이션이 가능하며, 상당히 빠른 속도로 실시간에 대응할 수 있는 수준의 기술도 개발되어 있다. 그러나 기존의 방식은 대부분 시간증분의 축적방식으로 이루어지므로, 연속적인 동작의 미소증분을 더하여 최종 자세를 추적하는 방식이 아닌 임의의 자세를 순간적으로 구현하기에는 무리가 따른다.

본 연구에서는 인체에 착용된 의류의 변형을 시뮬레이션함에 있어 미리 정해진 운동경로를 따라 연속적으로 변형되는 방식이 아니라 순간적으로 팔다리를 뻗거나 몸을 굽히는 등의 임의의 자세에 대해 시간증분의 축적 없이 시뮬레이션할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 물리적인 방정식과 시각적 관찰에 의한 기하학적 표현 기법을 조합한 방식을 채택하였다. 신속하고 안정적인 시뮬레이션을 위하여 global-local 해석 기법을 도입하였다. 의류의 변형을 큰 스케일의 전반적인 변형과 작은 스케일의 국소적 주름으로 나누어 해석하고, 이를 차후에 중첩하는 방식을 채택하였다.

Global 스케일의 전체적인 변형은 신체부위의 위치 및 움직임에 의해 비교적 손쉽게 결정된다. 움직이는 물체의 운동에 대해 몇 개의 키 프레임(key frame)을 설정하고 skinning & tweening 등의 기술을 이용하여 키 프레임 사이의 운동을 보간법으로 부드럽게 구현하는 방법은 컴퓨터 게임 등의 분야에서 이미 널리 사용되고 있으며, 이러한 skinning & tweening 기법은 의류 표현에도 적용되고 있으며 최근에는 여러 그래픽스 하드웨어 개발업체에 의해 그래픽프로세서의 내장기능으로 제공되고 있기도 하다.

이와는 달리 local 스케일의 국소적인 잔주름은 기존

의 소프트웨어에서 원활하게 구현되기가 어려운 부분에 해당하며, 지나치게 긴 연산시간과 과도한 작업부담으로 인해 작업자들로부터 기피되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 작은 주름에 해당하는 영역을 수학적으로 elliptical 한 성질의 방정식들을 사용하여 해석함으로써 지나간 시간단계에서의 결과에 의존하지 않고 순간적인 힘의 평형으로부터 직접 계산될 수 있도록 하였으며, 그 결과 큰 폭의 연산시간 단축과 안정성 향상이 얻어질 수 있도록 하였다. 임의의 두 자세 사이의 연속 동작을 시뮬레이션 함에 있어서도 두 정지 자세 사이의 움직임을 보간법으로 구현하여 연속적인 의류의 변형을 구현할 수 있도록 하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 의류 주름의 특성에 관한 기하학적 관찰

인체에 착용된 의류에 가해지는 힘은 의류 내부의 힘과 외력으로 분류될 수 있다. 동역학적 법칙에 의해 의류의 각 질점에 가해지는 힘의 평형은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = F_{\text{ext}} + F_{\text{int}} \quad (1)$$

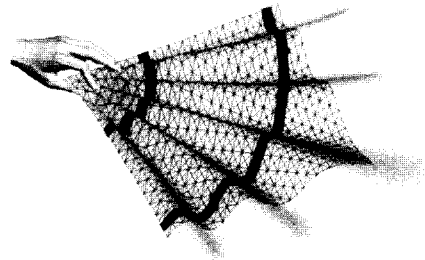
여기서 \mathbf{r} 은 의류의 각 질점의 위치벡터, m 은 각 질점이 대표하는 질량, F_{ext} 와 F_{int} 는 각각 외력과 내력을 의미한다. 내력은 다시 의류 질점 사이의 탄성력과 점성력 등으로 나누어진다. 외력에는 의류와 인체 사이의 상호작용에 의한 힘, 중력, 바람에 의한 항력 등이 포함된다 [4].

인체와 의류 사이의 접촉점에 가해지는 상호작용은 좁은 면적에 가해지는 밀집하중, 혹은 상대적으로 넓은 면적에 가해지는 분포하중으로 고려될 수 있다. 식 (1) 및 이의 변형된 형태를 사용하여 의류의 전반적인 변형과 국소적인 주름을 모두 표현할 수 있으며, 기존의 의류 시뮬레이션 알고리즘에서 대부분 이러한 방식이 채택되고 있다. 그러나, 국소적인 주름의 정교한 세부 표현을 위해서는 수치해석 격자점의 밀도가 높아져야 하는 문제점이 존재한다. 모든 계산영역을 이처럼 세밀한 격자로 계산하는 것은 연산의 속도를 크게 떨어뜨리는 요인이 되어 신속한 시뮬레이션에 적합하지 않다.

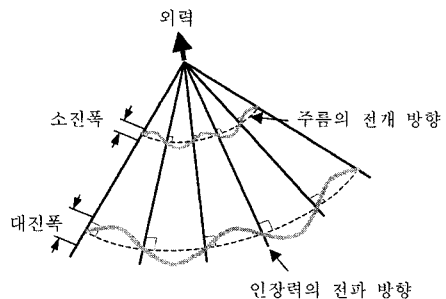
본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 의류의 변형을 global 스케일의 변형과 국소적인 local 스케일의 주름으로 나누어 해석하는 기술을 개발하였다. 또한, 국소적인 주름의 묘사를 위하여 물리적 법칙뿐만 아니라 시각적으로 보여지는 의류의 세부적인 주름의 특성을 관찰하여 이를 기하학적으로 중첩시키는 방식을 채택하였다.

의류의 다양한 변형에 대한 시각적 관찰에 따르면, 실제 의류에 있어 평면 방향의 변형은 주로 의류에 가해지는 인장력에 의해 발생하며, 평면에 수직인 방향의 변형, 즉 굴곡 현상은 옷감의 좌굴(buckling) 현상에 의해 발생한다. 옷감은 일반적으로 평면 방향의 인장력에 대해서는 변형에 저항하는 힘이 강한 반면 평면에 수직인 방향으로의 좌굴에 대해서는 쉽게 순응하는 성질을 가지고 있다. 그 결과 인장력은 옷감의 주름 방향으로 전달되고 주름이 그 방향으로 정렬되는 것이 일반적이며, 그 주름에 수직인 방향으로로는 쉽게 좌굴 현상이 일어나는 것을 관찰할 수 있다(그림 1(a) 참조).

주름의 진폭은 일반적으로 접촉점으로부터의 거리에 따라 달라지며, 접촉점과의 거리가 멀어질수록 주름의 진폭이 커지고 거리가 짧아지면 진폭이 작아지는 현상이 관찰된다. 인체에 의류가 착용 되었을 때의 접촉점은 인체의 피부와 의류가 만나는 점에 해당하므로, 의류의 주름은 인체와의 접촉 및 그 점에서의 힘의 방향에 따라 결정되며, 의류의 주름이 펼쳐지는 방향은 인장력의 방향과 수직임을 관찰할 수 있다(그림 1(b) 참조). 본 연구에서는 이와 같이 시각적으로 관찰되는 의류의 변형특성을 반영하기 위하여 주름의 크기와 분포의 상태



(a) 모서리에서 끌어진 옷감의 주름 시뮬레이션



(b) 주름이 형성된 옷감의 개략도

그림 1 의력이 가해진 경우 옷감 내부의 인장력의 방향 및 주름의 진폭

를 결정하는 단순화된 수학적 방정식을 도입하여 세부적인 주름을 효과적으로 묘사하는 방법을 제안하였다.

2.2 평면 방향의 변형과 평면 수직 방향의 주름의 비연계화

내부 응력 및 외력에 의한 의류 변형의 시각적 관찰 결과에 기초하여, 주름의 진폭 및 방향에 대한 단순화된 미분방정식을 유도할 수 있다. 제안된 방식의 기본적인 착안점은 의복의 전체적인 굽힘 변형이나 평면방향의 인장 변형 등과 같은 전체(global) 스케일의 변형과 작은 스케일의 국소적인(local) 주름을 비연계화(decoupling)하는 것이며, 국소적 주름의 변위가 크지 않으므로 비선형적 효과를 무시할 수 있음을 가정하고 두 결과를 중첩하는 것이 가능함을 전제로 한다. 식 (1)에 주어진 평형방정식을 사용하여 global 스케일의 변형을 해석할 수 있다.

이 때 국소적인 주름이 배제된 상태로 해석되므로 global 해석에 사용되는 수치해석 격자의 밀도를 충분히 낮추어 연산속도를 빠르게 할 수 있다. 국소적 주름에 관한 미분방정식은 약간의 추가적인 가정을 필요로 한다. 2회 미분이 가능한 스칼라 함수 Φ 를 주름의 진폭을 나타내는 함수(wrinkle amplitude function)로 가정하면, 응력벡터 $\vec{\sigma}$ 는 스칼라 함수 Φ 의 공간적인 구배에 비례상수 $-k_\phi$ 를 곱한 벡터로 정의할 수 있다.

$$\vec{\sigma} = -k_\phi \nabla \Phi \tag{2}$$

옷감의 자체하중을 제외하면 옷감의 내부에서 자발적으로 발생하는 응력이 존재하지 않을 경우 $\vec{\sigma}$ 의 다이버전스(divergence)는 0이 되고 따라서 주름 진폭 함수 Φ 는 라플라스(Laplace) 방정식을 만족시킨다.

$$-\nabla \cdot \vec{\sigma} = k_\phi \nabla^2 \Phi = k_\phi \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{3}$$

여기서 x 와 y 는 각각 개체부착좌표계(body-fitted coordinate system)의 두 개의 좌표축을 의미한다.

주름은 골과 산의 반복적인 형태를 가지고 있으므로 진폭과 주기가 변화하는 삼각함수를 이용하여 근사화할 수 있다. 실제 옷감의 주름에 관한 시각적 관찰 결과에 따라 주름의 진폭 Φ 와 주기적 주름의 위상각 Ψ 는 서로 직교함을 가정하면, 두 스칼라 함수는 켈레복소함수의 관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 이 두 스칼라 함수를 포함하는 복소 포텐셜 F 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(z) = \Phi(x, y) + i\Psi(x, y) \tag{4}$$

$$z = x + iy$$

여기서 z 는 복소 좌표에 해당한다.

주름의 진폭과 위상각은 켈레복소함수로 가정되었으므로, 비례상수 k_ϕ 와 k_ψ 를 곱하면 코시-리만(Cauchy-Riemann) 방정식[17]이 만족된다.

$$k_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} = k_\psi \frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

$$k_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -k_\psi \frac{\partial \Psi}{\partial x} \tag{5}$$

식 (3)과 식 (5)의 결과로부터, 위상각 Ψ 역시 다음과 같은 라플라스 방정식을 만족시키는 해가 된다.

$$k_\psi \nabla^2 \Psi = k_\psi \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{6}$$

두 개의 켈레복소함수 Φ 와 Ψ 는 서로 직교하므로, 주름진폭과 위상각의 등치선(isocontour lines)들로 구성되는 직교망(orthogonal net)을 도출할 수 있다.

주름진폭 Φ 와 위상각 Ψ 를 사용하여, 평면에 수직인 방향의 변위 ω 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega = \Phi \sin \Psi \tag{7}$$

옷감 자체의 인장 및 수축의 면적이 충분히 작다고 가정하면 평면에 수직인 방향으로의 변위는 주름의 투영면적의 감소를 야기시킨다. 이러한 투영면적의 변화는 다음과 같은 평면좌표의 이동을 통해 보상될 수 있다.

$$x' = x - \frac{1}{2} \int \left(\frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx \quad y' = y - \frac{1}{2} \int \left(\frac{d\omega}{dy} \right)^2 dy \tag{8}$$

2.3 경계조건

접촉점에서의 주름의 진폭은 0으로 고정되고 식 (2)에 의하여 이 접촉점에 가해지는 외력은 주름 진폭의 공간적 구배로 정의되므로, 접촉점에서는 켈레경계조건(conjugate boundary condition)을 적용하여야 한다.

$$\Phi = 0$$

$$-k_\phi \nabla \Phi = \vec{\sigma} = \sigma_x \hat{i} + \sigma_y \hat{j} \quad \text{: 각 접촉점에서} \tag{9}$$

여기서 \hat{i} 와 \hat{j} 는 개체부착좌표계에서의 각 좌표축 방향의 단위벡터이다. 접힘이 발생하는 부위에서는 위상각을 일정한 값으로 지정할 수 있다[3].

$$\Psi = \text{constant} \quad \text{: 접힘선을 따라서} \tag{10}$$

각 접촉점에서 응력벡터 $\vec{\sigma}$ 는 의류와 인체의 동역학적 평형으로부터 결정될 수 있다. 접촉점에서는 평면 수직방향의 변형이 존재하지 않으므로 주름의 진폭이 0으로 고정될 수 있다.

그림 2에서는 정사각형의 옷감이 상단부 모서리의 두 접촉점에서 고정되고 중력에 의해 아래쪽으로 처짐이 발생할 경우 옷감에 가해지는 힘의 평형을 도식적으로 나타내었다.

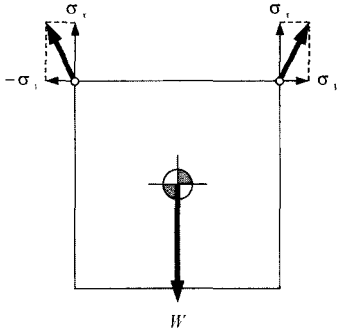


그림 2 수직으로 늘어뜨려진 옷감에서의 힘의 평형

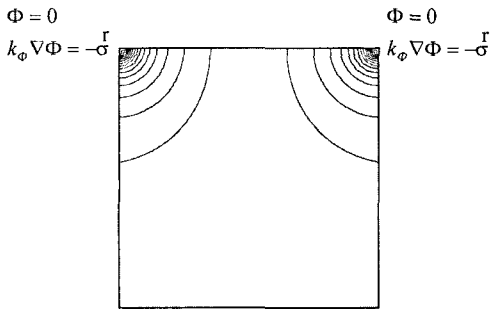
접촉점에서의 응력벡터는 힘의 평형으로부터 계산되며, 주름진폭 Φ 에 관한 미분방정식을 계산하는데 필요한 경계조건으로 입력된다. 수직으로 늘어뜨려진 4각형 옷감에 대해 주어진 경계조건 및 그에 따라 계산된 주름의 진폭이 그림 3(a)에 도시되어 있다. 주름의 진폭은 접촉점에서 0이 되며, 접촉점으로부터 멀어질수록 진폭이 커진다. 식 (5)에서 주어진 주름진폭 Φ 와 위상각 Ψ 사이의 직교성의 원리를 사용하여, 위상각의 분포를 식

(6)의 결과로 얻을 수 있다. 그림 3(b)는 주름진폭 Φ 와 위상각 Ψ 에 대한 등치선들을 나타낸다.

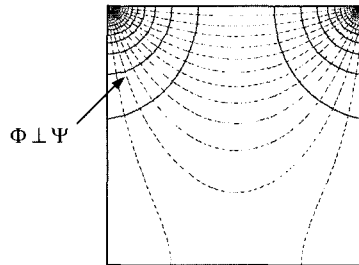
3차원적 문제에 있어서, 접촉점에서의 응력 벡터는 평면에 수직인 방향으로의 추가적인 방향성분을 가진다. 복잡한 3차원의 의류형상에 있어서 각각의 접촉점에 가해지는 응력은 의류를 얇은 셸(shell) 구조물로 가정하여 단순화시킬 수 있다. 대부분의 경우에 있어 의류의 기본적인 접촉점은 이미 결정되어 있다. 셔츠 종류는 보통 어깨, 목, 가슴, 팔꿈치, 손목 등에 고정적인 접촉점이 존재한다. 바지 종류는 보통 허리 부분에 벨트가 착용되며 둔부, 무릎, 발목 등에 접촉점이 존재한다. 이러한 접촉점들에서는 주어진 켈레조화방정식을 해석하기 위해 필요한 경계조건이 요구된다.

2.4 접촉력과 경계조건

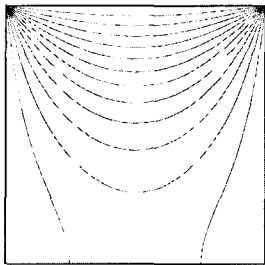
임의의 자세에 착용된 의류의 global 스케일의 변형된 형태는 초기의 의류 패턴을 인체의 자세에 맞게 안착시킴으로써 얻어진다. 이러한 기본 변형은 인체의 각 부분의 방향과 위치에 따라 의류패턴의 각 부분을 적절히 이동 혹은 회전시켜 구해진다. 의류의 각 부분은 3차형의 유한요소와 격자의 구조로 이산화 되어 유한요소



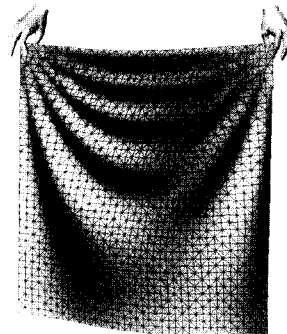
(a) 접촉점에서의 켈레경계조건을 적용하여 구해진 등진폭선의 분포



(c) 등진폭선과 등위상각선으로 이루어진 직교망



(b) 등위상각선의 분포



(d) 켈레조화함수를 이용한 의류주름 시뮬레이션의 결과

그림 3 수직으로 늘어뜨려진 옷감의 주름 해석

해석에 사용된다. 접촉점들은 이러한 FEM 격자구조의 각 정점(vertex)들과 인체표면 사이의 거리를 계산함으로써 결정될 수 있다. 특정한 정점에서의 거리가 미리 설정된 임계치보다 작아지면 그 점은 접촉점으로 간주된다. 각 접촉점에서의 힘은 x, y, z 방향의 역학적인 평형방정식을 해석함으로써 구해질 수 있다. 그림 4는 접촉점의 예를 도시하고 있다. 음영으로 칠해진 부분의 의류와 인체가 접촉하는 영역을 나타내며, 굵은 실선 부위는 굽힘에 의한 접힘선(fold line)을 나타낸다.

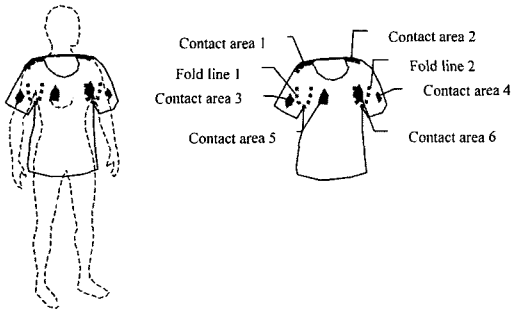


그림 4 인체에 착용된 의류의 접촉부위와 접힘선

3. 유한요소 해석

3.1 수치해석 기법 및 해석 과정

인체에 착용된 의류의 주름을 시뮬레이션 하기 위해 유한요소법을 기반으로 하는 수치해석 소프트웨어를 작성하였다. 각 유한요소 격자점 사이에서의 물리량의 보존법칙을 보다 효과적으로 충족시키기 위하여 기존의 유한요소법에 제어체적법을 적용한 수치해석 기법이 사용되었다[18]. 개체부착좌표계 상에서 전체 계산 영역은 유한한 개수의 삼각형 요소로 이산화 되었다. 각각의 격자점들은 그 점들을 포함하는 인접 유한요소들의 경계면의 중점과 유한요소의 무게중심을 연결하여 이루어진 미소 제어체적(control volume)을 대표한다. 계산 영역은 삼각 유한요소로 분할되며, 동시에 유한한 개수의 제어체적으로 분할된다(그림 5 참조). 이와 같이 하여 생성된 다각형 형태의 유한체적의 경계면은 각 제어체적

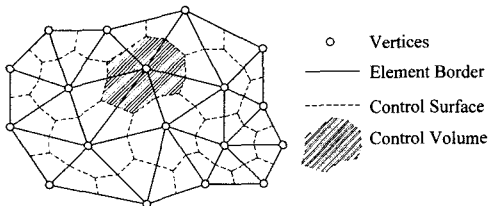


그림 5 삼각형 유한요소와 다각형 제어체적으로 구성된 격자계

에 대응하는 제어표면(control surface)으로 정의된다. 각각의 제어체적에 대해 식 (3)과 식 (6)의 라플라스 방정식을 적용하여 주름의 진폭과 위상각에 대한 미분방정식을 해석하여 local 스케일의 주름 분포를 구한다.

주름 시뮬레이션은 다음과 같은 순서로 진행된다. 우선, 주름이 없는 초기형태의 옷이 인체의 자세에 알맞게 안착되고, 유한요소 격자점들과 인체 표면 사이의 거리가 계산된다. 그 거리가 미리 설정된 임계치 보다 작을 경우, 해당하는 격자점은 접촉점으로 분류된다. 경우에 따라서는, 몇 개의 격자점들이 인체의 표면 안쪽으로 침투하는 경우가 발생할 수 있으며, 특히 옷이 인체의 곡면을 제대로 따라가지 못하는 경우에 이런 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 경우 접촉보정 알고리즘을 사용하여 문제가 발생한 격자점을 인체의 표면에 위치시키는 방식으로 조정할 수 있다.

의류가 인체 위에 올려지고 접촉점에 대한 보정이 완료된 후 역학적 평형방정식이 적용되어, 주어진 인체의 자세에 해당하는 접촉점의 외력이 계산된다. 이러한 접촉점에서의 외력을 계산함에 있어, 각각의 격자점들은 제어체적 내부의 다각형 면적을 대표하는 질점으로 간주된다(그림 5 참조). W_i 로 표기된 수직벡터는 접촉점 i 를 둘러싼 미소 다각형에 가해지는 중력을 나타낸다. 격자점 사이의 평면방향의 힘 및 중력에 더하여, 접촉영역에서의 각 격자점들은 수직력을 받게 되며, 그 수직력은 인체와 의류 사이의 역학적 상호작용에 의해 결정된다. 일례로서, 그림 5의 격자점 i 에 가해지는 C_i 로 표기된 힘이 그 예에 해당한다. 각 격자점에 가해지는 내력의 총 합력으로부터 x, y, z 방향의 힘의 평형에 의해 각 접촉점에서의 접촉력이 결정된다.

각 격자점에서의 접촉력은 식 (4)를 사용하여 주름진폭의 분포를 계산하기 위한 경계조건으로 입력된다. 주름진폭의 공간적 구배는 식 (5)에 의해 위상각과 연관된다. 주름진폭과 위상각이 구해진 후에는, 식 (7)을 사용하여 각 격자점에서의 평면수직 방향의 변위가 결정된다. 평면상에서 고정된 좌표값에서 수직 방향의 변위가

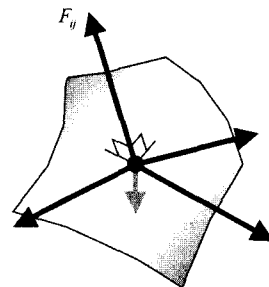


그림 6 접촉점에서의 힘의 평형

가해질 경우 섬유의 총 면적의 증가가 발생하므로, 이러한 면적의 변화를 식 (8)을 이용하여 보정하기 위해 평면상의 좌표점을 이동시켜 특정 방향으로 섬유의 인장이 발생하더라도 총 면적은 보존되도록 조정한다.

의류의 변형에 대한 시각적 관찰에서 확인될 수 있는 바와 같이, 옷감은 인장력만을 전달할 수 있으며 압축력은 제대로 전달하지 못하고 좌굴(buckling)현상이 일어나게 된다. 따라서, 유한요소 격자 사이의 특정 부위에서 압축력이 감지될 경우 그 격자를 제외한 상태에서 역학적인 평형방정식이 다시 해석되어야 한다. 식 (3)과 식 (6)에 divergence 정리를 적용하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\int_{C_V} k_\phi (\nabla \cdot \nabla \Phi) d\Omega = \int_{C_S} k_\phi \nabla \Phi \cdot \bar{n} ds = 0 \quad (11)$$

$$\int_{C_V} k_\psi (\nabla \cdot \nabla \Psi) d\Omega = \int_{C_S} k_\psi \nabla \Psi \cdot \bar{n} ds = 0 \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 각각의 유한요소에 대해 제어체적유한요소법[18]을 적용하고 식 (9)와 식 (10)의 경계조건을 이용하면 주름의 진폭과 위상각의 분포를 구할 수 있다.

3.2 Random noise의 추가

실제의 주름진 의류는 이상화된 수학적 방정식만으로 표현할 수 없는 다양한 요소들을 내포하고 있다. 이러한 요소들에는 섬유 조각들을 재봉하여 결합하는 과정에서 생기는 결합, 위치 불균일성 및 의류를 착용하고 활동하는 과정에서 발생하는 마모 등의 여러 가지 요소가 포함된다. 역설적으로, 이러한 결합들이 실제 인체에 착용된 의류의 현실감을 표현하는데 중요한 요소가 된다. 이러한 무작위적인 요소들을 정량화 하기는 매우 어려우나, 약간의 수치적인 교란을 인위적으로 가미함으로써 자연스러운 주름의 현실감을 향상시킬 수 있다. 그 한가지 예는 식 (13)에 나타난 것과 같이 무작위 노이즈(random noise)를 추가하는 방법이다.

$$\begin{aligned} \Phi_i^{R.N.} &= \Phi + \sin\left(\frac{r_i - a_i^\phi}{b_i^\phi - a_i^\phi} \pi\right) \left[u(r_i - a_i^\phi) - u(r_i - b_i^\phi) \right] \\ \Psi_i^{R.N.} &= \Psi + \sin\left(\frac{r_i - a_i^\psi}{b_i^\psi - a_i^\psi} \pi\right) \left[u(r_i - a_i^\psi) - u(r_i - b_i^\psi) \right] \\ \omega_i^{R.N.} &= \Phi_i^{R.N.} \sin(\Psi_i^{R.N.}) - \Phi \sin \Psi \\ \tilde{\omega} &= \omega + \sum_{i=1}^N \omega_i^{R.N.} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 r_i 는 각 접촉점에서 각 격자점에 이르는 측량 거리(geodesic path)이며, $u(x)$ 는 다음과 같은 계단함수(step function)이다.

$$u(x-a) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 1 & x > a \end{cases} \quad (14)$$

$a_i^\phi, b_i^\phi, a_i^\psi, b_i^\psi$ 및 b_i^ψ 는 시뮬레이션으로 얻어진 주름에 임의의 노이즈를 첨가하기 위한 상수들이다. 노이즈를 추가하는 과정은 위에 설명된 수치해석 알고리즘과는 독립적이며, 반드시 필요한 과정이 아닌 선택사항에 해당한다. 노이즈의 추가는 최초의 자세에 대해 초기 생성된 값을 계속 사용하므로 초기자세와 최종자세 사이의 동작을 보간할 경우에도 노이즈에 의한 주름의 일관성 손상은 발생하지 않는다.

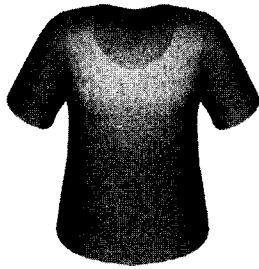
4. 주름 시뮬레이션 결과

제시된 알고리즘을 사용하여 인체에 착용된 티셔츠의 주름을 시뮬레이션 하였다. 티셔츠는 삼각형의 유한요소와 격자점으로 이산화 되었으며, 유한요소들은 인체에 올려져 인체 표면과의 거리를 계산하여 접촉 상태를 결정하였다. 그림 7(a)는 global 스케일 변형의 결과를 보여준다. 접촉점들과 접힘선들은 앞서 제시된 바와 같은 방식으로 결정되었으며, 식 (3)의 주름 진폭을 해석하기 위한 경계조건으로 사용되었다. 주름 진폭의 공간적 구배는 주름의 방향을 결정짓기 위해 사용된다.

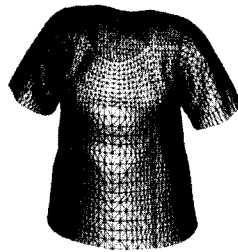
주름 진폭과 위상각이 결정된 후에는, 식 (7)을 사용하여 주름 없는 초기형상과 비교하여 각 격자점에서의 상대적인 수직 변위를 결정짓는데 사용된다. 각 격자점에서의 변위가 양수인 경우 해당 부위는 주름의 산을 형성하며, 변위가 음수인 경우는 주름의 골을 형성한다. 각 격자점의 평면상의 좌표는 식 (8)을 사용하여 보정되어 각 유한요소의 면적이 보존되도록 조정된다. 주름의 진폭 및 위상각에 관한 방정식들이 elliptical한 성질을 가지므로, 주름은 주어진 임의의 자세에 대하여 직접 계산될 수 있다. 주름 시뮬레이션 결과의 예가 그림 7(b)에 주어져 있다. 총 유한요소 개수는 6,602개였으며, Intel Pentium IV 1.4 GHz를 기준으로 하여 소요된 CPU time은 0.72초였다.

실제 의류에 있어서, 주름 밀도(wrinkle intensity)는 옷감 고유의 여러 가지 물리적 성질에 관련된다. 동일한 인체 자세에서도 서로 다른 옷감의 물성에 따라 다양한 주름의 형상이 얻어질 수 있다. 그림 7(c)는 식 (3)의 k_ϕ 값과 식 (6)의 k_ψ 값의 변화에 따라 달라지는 주름 밀도의 변화의 결과가 나타나어져 있다. 이 결과에 따르면 k_ϕ 값이 커질수록 주름 진폭은 감소하는 현상이 관찰되었다. 반대로 k_ψ 의 값이 커지면 위상각의 증가폭이 감소하여 주름 사이의 간격이 늘어나는 것으로 관찰되었다.

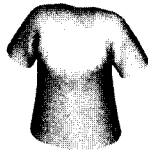
그림 8에는 인체에 착용된 스웨터의 주름을 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 과정은 그림 7의



(a) global 스케일의 변형



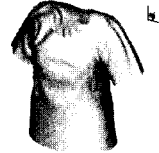
(b) local 스케일의 잔주름



저 주름밀도
($k_{\phi}=3.0, k_{\psi}=0.1$)



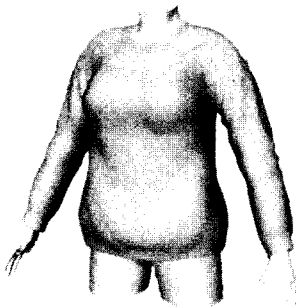
중 주름밀도
($k_{\phi}=1.0, k_{\psi}=0.05$)



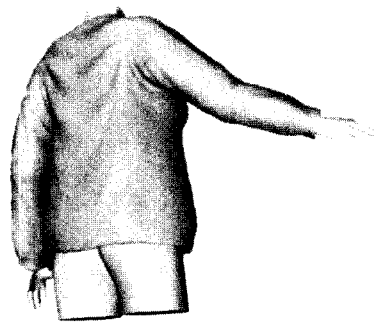
고 주름밀도
($k_{\phi}=0.5, k_{\psi}=0.02$)

(c) 주름밀도의 조정

그림 7 인체에 착용된 티셔츠의 주름 시뮬레이션



(a) 초기 자세



(b) 회전 후 거수 자세

그림 8 스웨터를 착용한 인체의 급격한 동작의 변화에 대한 주름 시뮬레이션 결과

티셔츠 시뮬레이션의 경우와 동일하게 진행되었다. 이 경우 인체는 그림 8(a)의 직립자세에서 시작하여 그림 8(b)와 같이 회전하고 좌측 팔을 들어올리는 불연속적인 자세로 순간적으로 변화하였다. 제시된 알고리즘에 의하면 elliptical 방정식에 의해 주름이 시뮬레이션 되므로 초기 자세와 회전 후 거수자세 사이의 중간 단계에 대한 고려가 불필요하며, 시간적인 보간 알고리즘 없이 두 자세에 대해 직접적으로 주름 해석 알고리즘이 적용되어 계산을 수행할 수 있었다. 계산에 사용된 삼각형 유한요소의 총 개수는 8,814개였으며, 소요된 CPU time은 그림 8(a)의 경우 0.91초, 그림 8(b)의 경우 1.02

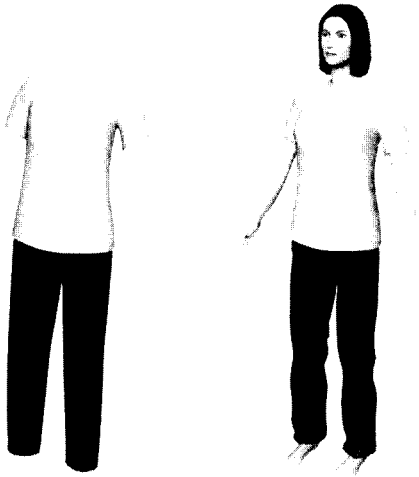
초였다. 사용된 컴퓨터의 하드웨어 사양은 Intel Pentium IV 1.4 GHz CPU를 사용하는 개인용 PC에서 시뮬레이션이 수행되었다.

그림 9에서는 상하의를 동시에 착용한 인체의 global 스케일 변형과 local 스케일의 국소적 주름을 순간적으로 중첩한 결과를 제시하였다.

본 연구의 제안방식은 연속적인 시간증분의 축적 방식이 아니라 순간적으로 급격하게 변화하는 자세에 대해 중간단계의 시간증분 삽입 없이 시뮬레이션이 이루어진다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 한 개의 프레임 당 소요되는 연산시간은 비슷한 절점 개수의 기존의 결

표 1 기존 기술과의 연산효율 비교

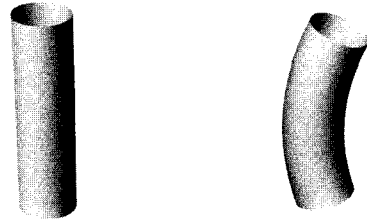
	Vertex 개수	한 프레임 당 연산시간	물리적 시간증분	사용된 CPU 사양
기존 알고리즘[19]	1,000	0.04초	0.04초	Pentium 4 1.7GHz
본 제안기술	1,092	0.061초		Pentium 4 1.4GHz
기존 알고리즘[21]	5,608	6.13초	0.0111초	Pentium 3 550MHz
본 제안기술	8,814	0.91초 (frame 8a) 1.02초 (frame 8b)		Pentium 4 1.4GHz



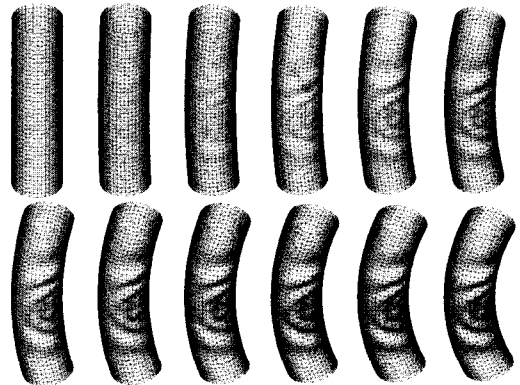
(a) Global 스케일 변형 (b) Local 스케일 주름의 중첩
그림 9 Global 스케일의 변형과 local 스케일의 주름의 중첩

과와 비교하여 다소 빠른 경우도 있고 큰 차이가 없는 경우도 있다. 그러나 하나의 자세에서 다른 자세로 급격히 변화할 때 소요되는 총 연산시간을 비교하면, 기존의 경우 두 자세 사이에 삽입되는 시간증분의 수에 비례하여 총 연산시간이 증가하는데 반하여, 본 제안방식의 경우 시간증분을 삽입하지 않으므로 두 자세의 유사성과는 무관하게 초기 자세와 최종 자세 각각에 대한 연산 시간 이외에는 추가적인 시간이 소요되지 않는다. 본 기술과 기존의 기술은 구현방식 및 적용방법이 서로 다르므로 표 1의 결과는 절대적 수치의 단순 비교 보다는 각 방식의 특징을 개념적으로 비교하기 위한 자료로 이용될 수 있다.

본 제안기술은 임의의 정지자세에 대하여 인체에 착용된 의복의 변형을 순간적으로 구현하기 위한 신속하고 안정적인 시물레이션기법의 개발에 주안점을 두고 있으나 그 적용범위는 정지자세에 국한되지 않으며, 인체의 움직임과 의복의 변형이 연속적으로 이루어지는 경우에 대해서도 접촉점에서의 응력이 시간에 따라 연속적으로 변화하면 주름의 형상 역시 연속적인 결과를 얻을 수 있다.



(a) Global 스케일의 불연속적인 변형



(b) 보간기법을 사용한 global 스케일 변형과 local 스케일 주름의 연속적인 중첩

그림 10 연속적인 변형에 대한 주름의 연속성

그림 10에서는 보간기법을 사용하여 두 정지자세 사이의 연속적인 변형을 구현한 예이다. 두 정지자세는 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 불연속적으로 곡률이 변화한다. 그림 10(b)는 이 두 자세 사이의 의류의 변형을 보간하여 연속적인 주름의 변화를 구현한 결과이다. 이 방법을 사용하면 물체의 움직임을 기준적인 몇 단계의 정지자세로 단순화한 후 각 정지자세 사이의 변형을 보간하여 연속적인 의류 시물레이션이 가능하다. 이 방식은 전체 동작을 미소한 시간증분에 대하여 매번 시물레이션하는 방식에 비해 몇 단계의 정지자세에 대해서만 순간적인 의류변형을 시물레이션하여 보간하게 되므로 전체적으로 연산의 속도가 개선될 수 있다.

이와 같은 보간의 개념은 최근 게임 등의 분야에서의 skinning & tweening 기법에서도 채택되어 폴리곤 구

조제의 연속적 변형을 몇 단계의 기준자세의 각 구간을 보간하는 방식이 사용되고 있다. skinning & tweening 기법에서는 세부적인 주름이나 접힘 등은 비트맵 텍스처를 사용하여 처리하고 있으나, 본 기술을 skinning & tweening 기법에 적용할 경우 global scale의 변형은 기존의 방식으로 구현하고 국소적인 주름은 본 연구의 해석기법을 사용해 처리함으로써 비트맵 텍스처 방식에 비해 보다 사실적인 의류의 주름을 신속하고 안정되게 구현할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 켈레조화함수들 사이의 직교성을 이용한 비순차적 수치해석 기법을 사용하는 주름 시물레이션 기법을 개발하였다. 제시된 알고리즘은 global-local 해석 기법을 채택하였으며, global 스케일의 전체적인 변형과 local 스케일의 작은 주름으로 분리하여 주름을 해석한 후 두 스케일의 변형이 선형적으로 중첩될 수 있음을 가정하여 신속한 시물레이션이 가능하도록 하였다. 주름에 관한 미분방정식들의 수학적 성질이 elliptical 하므로, 국소적 주름에 대한 시물레이션은 각 시간 단계의 역학적 평형에만 관계될 뿐 그 전 단계의 계산 결과에 의존하지 않았다. 그 결과 시간적분의 단계가 불필요하여 연산효율이 향상되고 수치적인 안정성이 개선되었으며, 급격하고 불연속적인 자세의 변화에 대해서도 추가적인 시간증분을 삽입하지 않고 원하는 시간단계에 대하여 직접 연산수행이 가능하였다. 임의의 두 자세 사이의 연속 동작을 시물레이션 함에 있어서도 두 정지 자세 사이의 움직임 보간법으로 구현하여 연속적인 의류의 변형을 구현할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. Weil, "The synthesis of cloth objects," *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.49-54, 1986.
 [2] T. Agui, Y. Nagano and M. Nakayama, "An Expression method of Cylindrical Cloth Objects - An Expression of Folds of a Sleeve using Computer Graphics," *Trans. Soc. Of Electronics, Information and Communications*, Vol.J73-D-II, No.7, pp.1095-1097, 1990.
 [3] H. Ng and R.L. Grimsdale, "GEOFF - A Geometrical Editor for Fold Formation," *Lecture Notes in Computer Science Vol. 1024: Image Analysis Applications and Computer Graphics*, R. Chin et al., eds., Springer-Verlag, Berlin, pp.124-131, 1995.
 [4] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, K. Fleischer, "Elastically deformable models," *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.205-214, 1987.
 [5] M. Aono, "A Wrinkle Propagation Model for

Cloth," *Proc. of Computer Graphics International*, Vol.4, 1988, pp.306-331
 [6] T.L. Kunii and H. Gotoda, "Singularity Theoretical Modeling and Animation of Garment Wrinkle Formation Process," *Visual Computer*, Vol.6, No.6, pp.326-336, 1990.
 [7] F. Tallefer, "Mixed Modeling," *Proc. Compugraphics*, pp.467-478, 1991.
 [8] P. Volino and N.M-Thalmann, "Collision and self collision detection: efficient and robust solutions for highly deformable surfaces," *Computer Animation and Simulation*, pp.55-65, 1995.
 [9] P. Volino and N.M-Thalmann, "An evolving system for simulating clothes on virtual actors," *Computer Graphics in Textiles and Apparel*, pp.42-51, September 1996.
 [10] P. Volino and N.M-Thalmann, "Developing simulation techniques for an interactive clothing system," *International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp.109-118, 1997.
 [11] D.E. Breen, D.H. House and P.H. Getto, "A physically-based particle model of woven cloth," *Visual Computer*, Vol.8, pp.264-277, 1992.
 [12] David Baraff and Andrew Witkin, "Large steps in cloth simulation," *Computer Graphics*, pp.43-54, 1998.
 [13] F. Cordier, P. Volino and N.M-Thalmann, "Integrating deformations between bodies and cloths," *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.12, pp.45-53, 2001.
 [14] Mark Meyer, Gilles Debunne, Mathieu Desbrun and Alan J. Barr, "Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality," *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.12, pp.1-12, 2001.
 [15] R.P. Urbiola and R. Rudomin, "Multi-layer implicit layer models," *Shape Modelling International*, pp.66-71, 1999.
 [16] I. Rudomin, R.P. Urbiola, M.E. Melon and J.L. Castillo, "Multilayer garments using isosurfaces and physics," *J. of Visualization and Computer Animation*, Vol.12, pp.215-226, 2001.
 [17] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics 8th Ed.*, Prentice Hall, 1999.
 [18] B.R. Baliga and S.V. Patankar, "Elliptic Systems: Finite-Element Method II," *Handbook of Numerical Heat Transfer, Part II*, W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow, G.E. Schneider, R.H. Pletcher, Eds., John Wiley & Sons, Inc., 1988.
 [19] S.W. Oh, H.S. Kim, Kwangyun Wahn, "Collision Handling for Interactive Garment Simulation," *VSSM 2002*, pp.239-252, 2002.
 [20] 장미정, 오승우, 원광연, "온라인 의류쇼핑몰을 위한 가상 가봉 시스템", HCI 2004 학술대회, pp.1-6, 2004. 2.
 [21] Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko, "Stable but

Responsive Cloth," ACM Transactions on Graphics,
Vol.21, Issue 3, pp.604-611, 2002.



강 문 구

1991년 2월, 서울대학교 기계공학과 학사

1993년 2월, 서울대학교 기계공학과 석사

1997년 8월, 서울대학교 기계공학과 박사

1997년~1998년, Univ. of California

Los Angeles, Post-doctor. 1998년~

2000년 서울대학교 정밀기계설계공동연

구소 특별연구원. 2001년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 BK21 계약조교수