



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0068944
(43) 공개일자 2025년05월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06T 19/00 (2011.01) G06T 15/04 (2011.01)
G06T 17/20 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G06T 19/003 (2013.01)
G06T 15/04 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0155077
(22) 출원일자 2023년11월10일
심사청구일자 2023년11월10일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김중현
인천광역시 미추홀구 인하로 100, 1호관 512C(용현동, 인하대학교)
(74) 대리인
양성보

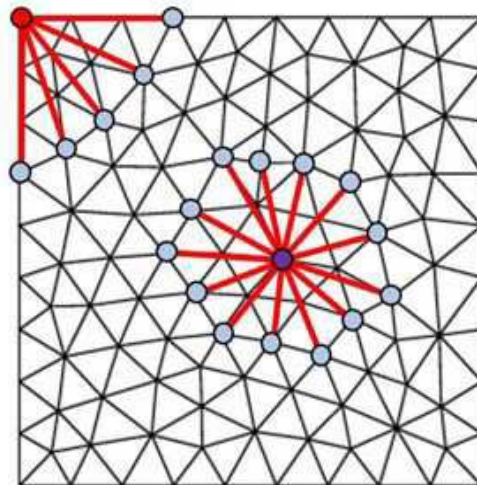
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 변형률 기반 동역학에서 LOD 기반 벤딩 스프링을 통해 삼각형 메쉬에서 안정적인 천을 시뮬레이션하는 방법 및 시스템

(57) 요약

변형률 기반 동역학에서 LOD 기반 벤딩 스프링을 통해 삼각형 메쉬에서 안정적인 천을 시뮬레이션하는 방법 및 시스템이 개시된다. 일 실시예에 따른 시뮬레이션 시스템에 의해 수행되는 옷감(Cloth) 시뮬레이션 방법은, 다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산하는 단계; 및 상기 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성하는 단계를 포함하고, 상기 계산하는 단계는, 상기 다각형 메쉬에서 LOD(Level of detail)를 통해 설정된 굵힘 스프링 구조를 생성하고, 상기 생성된 굵힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류
G06T 17/20 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

시뮬레이션 시스템에 의해 수행되는 옷감(Cloth) 시뮬레이션 방법에 있어서,
 다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산하는 단계; 및
 상기 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성하는 단계
 를 포함하고,
 상기 계산하는 단계는,
 상기 다각형 메쉬에서 LOD(Level of detail)를 통해 설정된 굽힘 스프링 구조를 생성하고, 상기 생성된 굽힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산하는 단계
 를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 계산하는 단계는,
 그린 변형률 텐서(Green's strain tensor)를 제약 함수로 사용하여 각 다각형의 변형률을 계산하는 단계
 를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
 상기 계산하는 단계는,
 상기 다각형 메쉬에서 LOD를 통해 굽힘 스프링 개수를 조절하여 옷감의 재질을 제어하는 단계
 를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,
 상기 계산하는 단계는,
 옷감 메쉬의 에지 길이를 이용하여 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수를 탐색하고,
 상기 탐색된 제1 굽힘 스프링 개수에 기초하여 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수를
 계산하는 단계
 를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,
 상기 계산하는 단계는,
 고정된 노드에서 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노드에 굽힘 스프링을
 추가하고, 상기 비고정된 노드에서 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노
 드에 굽힘 스프링을 추가하는 단계
 를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 6

제3항에 있어서,

상기 계산하는 단계는,

목표치 레벨을 설정하고, 고정된 노드 또는 비교정된 노드에서 상기 설정된 목표치 레벨에 기초하여 각 노드의 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가하는 단계

를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 계산하는 단계는,

상기 다각형 메쉬를 구성하는 노드의 위치를 업데이트하는 단계

를 포함하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 다각형 메쉬는, 삼각형 메쉬인 것을 특징으로 하는 옷감 시뮬레이션 방법.

청구항 9

시뮬레이션 시스템에 있어서,

다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산하는 동역학 계산부; 및

상기 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성하는 결과 생성부

를 포함하고,

상기 동역학 계산부는,

상기 다각형 메쉬에서 LOD(Level of detail)를 통해 설정된 굽힘 스프링 구조를 생성하고, 상기 생성된 굽힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산하는

것을 특징으로 하는 시뮬레이션 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

아래의 설명은 시뮬레이션 기술에 관한 것이다.

배경 기술

[0003]

위치 기반 동역학(Position-based dynamics, PBD)은 질량-스프링 구조보다 안정적이고 빠르게 수렴이 가능하기 때문에 실시간 애플리케이션에서 주로 사용되고 있다. 위치 기반 동역학은 길이의 변화 방향과 위치 변화량을 기반으로 원본 길이를 보존하는 방식이다. 하지만, 위치 기반 동역학은 삼각형 메쉬의 에지 길이를 기반으로 에너지를 계산하기 때문에 영역이나 볼륨을 보존하는 것에 대해서는 안정성이 떨어진다. 변형률 기반 동역학은 위치 기반 동역학의 문제를 해결하기 위해 제안된 기법이며, 에지 길이 대신에 삼각형의 변형률을 기반으로 동역학을 계산하는 구조이다. 전처리 과정에서 초기 삼각형의 변형률과 그의 기울기를 기반으로 동역학을 계산한다.

[0004]

변형률 기반 동역학은 에지 길이를 제한하는 대신에 변형된 입자 위치에서 유도된 Green-St Venant 변형 텐서를

활용한다. 변형(Strain)에서 응력(Stress)을 도출하고 변형 에너지로 통합하여 최종 힘을 계산하는 유한요소법과는 달리, 변형률 기반 동역학은 변형 텐서의 각 항목에 대한 위치 제약 조건을 이용하여 변형 텐서를 계산한다. 삼각형과 독립적으로 변형 텐서를 계산할 수 있다는 특징은 상대적으로 재질 제어를 쉽게 할 수 있기 때문에 다양한 물리 기반 시뮬레이션에서 장점이 된다. 하지만, 도 1을 참고하면, 큰 외력이 발생할 경우 비정상적인 삼각형 형태가 나타나고, 결과적으로 변형률이 잘못 계산되기 때문에 원하지 않은 옷감 형태가 나타난다.

[0005] 이러한 문제는 정점 하나를 고정시킬 때 명확하게 나타난다. 도 1에서 보듯이, 오른쪽 상단 정점 부근에 존재하는 삼각형들의 변형이 이상하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제를 완화시킬 수 있는 LOD 기반의 굽힘 스프링 구조와 감쇠 기법을 통해 안정적으로 탄성 에너지를 계산할 수 있는 기술이 요구된다.

[0006] 일반적으로 LOD는 컴퓨터 그래픽스에서 사용되는 개념으로, 시각적인 세부 수준을 제어하여 성능을 최적화하는 기술이며, 주로 실시간 3D 그래픽 애플리케이션에서 사용되며, 대규모 환경이나 복잡한 모델을 다룰 때 유용하다. LOD는 다양한 세부 수준의 모델을 사용하여 화면에 표시되는 개체의 세부 수준을 자동으로 조절하기 때문에, 그래픽 처리 성능을 향상시키고 실시간 애플리케이션에서도 부드러운 영상을 표현할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 삼각형 메쉬 기반에서 변형률 기반 동역학을 안정적으로 표현할 수 있는 LOD(Level of detail) 기반의 굽힘 스프링(Bending spring) 구조를 제공할 수 있다.

[0009] 굽힘 스프링의 개수를 자동으로 탐색하여 옷감의 재질을 제어할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0011] 시뮬레이션 시스템에 의해 수행되는 옷감(Cloth) 시뮬레이션 방법은, 다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산하는 단계; 및 상기 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성하는 단계를 포함하고, 상기 계산하는 단계는, 상기 다각형 메쉬에서 LOD(Level of detail)를 통해 설정된 굽힘 스프링 구조를 생성하고, 상기 생성된 굽힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 상기 계산하는 단계는, 그린 변형률 텐서(Green's strain tensor)를 제약 함수로 사용하여 각 다각형의 변형률을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 계산하는 단계는, 상기 다각형 메쉬에서 LOD를 통해 굽힘 스프링 개수를 조절하여 옷감의 재질을 제어하는 단계를 포함할 수 있다.

[0014] 상기 계산하는 단계는, 옷감 메쉬의 에지 길이를 이용하여 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수를 탐색하고, 상기 탐색된 제1 굽힘 스프링 개수에 기초하여 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0015] 상기 계산하는 단계는, 고정된 노드에서 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가하고, 상기 비고정된 노드에서 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가하는 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 상기 계산하는 단계는, 목표치 레벨을 설정하고, 고정된 노드 또는 비고정된 노드에서 상기 설정된 목표치 레벨에 기초하여 각 노드의 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가하는 단계를 포함할 수 있다.

[0017] 상기 계산하는 단계는, 상기 다각형 메쉬를 구성하는 노드의 위치를 업데이트하는 단계를 포함할 수 있다.

[0018] 상기 다각형 메쉬는, 삼각형 메쉬인 것일 수 있다.

[0019] 시뮬레이션 시스템은, 다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산하는 동역학 계산부; 및 상기 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성하는 결과 생성부를 포함하고, 상기 동역학 계산부는, 상기 다각형 메쉬에서 LOD(Level of detail)를 통해 설정된 굽힘 스프링 구조를 생성하고, 상

기 생성된 굽힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산할 수 있다.

발명의 효과

[0021] 굽힘 스프링 기반의 변형률 기반 동역학을 안정적이고 효율적으로 처리할 수 있기 때문에 옷감 시뮬레이션을 사실적으로 표현할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 고정된 포인트에서 발생하는 불안정한 변형률과 이를 활용한 SBD 기반 옷감 시뮬레이션을 나타낸 도면이다.

도 2는 일 실시예에 있어서, 시뮬레이션 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.

도 3은 일 실시예에 있어서, 옷감 시뮬레이션 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 4는 일 실시예에 있어서, 굽힘 힘을 인장 크로스오버 스프링(tensile crossover springs)에 따라 계산하는 것을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 일 실시예에 있어서, 적응적인 굽힘 스프링의 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 일 실시예에 있어서, 굽힘 스프링의 LOD 기반 구조적 연결 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 일 실시예에 있어서, 인장 크로스오버 스프링과 실시예에서 제안된 방법 사이의 굽힘 힘의 비교 결과를 나타낸 도면이다.

도 8은 일 실시예에 있어서, LOD 기반 굽힘 구조의 비교 결과를 나타낸 도면이다.

도 9는 일 실시예에 있어서, 실시예에서 제안된 방법으로 다양한 결과를 획득한 예이다.

도 10은 일 실시예에 있어서, 실시예에서 제안된 방법으로 옷감의 재질을 변경한 예이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 이하, 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0026] 실시예에서는 삼각형 메쉬(Triangular mesh) 기반에서 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 안정적으로 표현할 수 있는 LOD(Level of detail) 기반의 굽힘 스프링(Bending spring) 구조와 감쇠 동작에 대하여 설명하기로 한다. 변형률 기반 동역학은 삼각형 메쉬의 에지 길이(Edge length) 기반의 에너지 대신 변형률(Strain)을 활용하여 탄성 에너지를 모델링한다. 하지만, 큰 외력이 발생하면 에지 기반으로 탄성 에너지를 계산하는 과정에서는 비정상적인 삼각형(Degenerate triangle)이 나타나고 이 문제는 불안정한 변형률을 계산하기 때문에 잘못된 방향으로 늘어나는 문제가 발생한다. 실시예에서는 이러한 문제를 효율적으로 처리할 수 있는 LOD기반의 굽힘 스프링을 생성하고 에너지를 계산하는 방법에 대해 소개하기로 한다.

[0027] 도 2는 일 실시예에 있어서, 시뮬레이션 시스템의 구성을 설명하기 위한 블록도이고, 도 3은 일 실시예에 있어서, 옷감 시뮬레이션 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0028] 시뮬레이션 시스템(100)의 프로세서는 동역학 계산부(210) 및 결과 생성부(220)를 포함할 수 있다. 이러한 프로세서의 구성요소들은 시뮬레이션 시스템에 저장된 프로그램 코드가 제공하는 제어 명령에 따라 프로세서에 의해 수행되는 서로 다른 기능들(different functions)의 표현들일 수 있다. 프로세서 및 프로세서의 구성요소들은 도 3의 옷감 시뮬레이션 방법이 포함하는 단계들(310 내지 320)을 수행하는 시뮬레이션 시스템을 제어할 수 있다. 이때, 프로세서 및 프로세서의 구성요소들은 메모리가 포함하는 운영체제의 코드와 적어도 하나의 프로그램의 코드에 따른 명령(instruction)을 실행하도록 구현될 수 있다.

[0029] 프로세서는 옷감 시뮬레이션 방법을 위한 프로그램의 파일에 저장된 프로그램 코드를 메모리에 로딩할 수 있다. 예를 들면, 시뮬레이션 시스템에서 프로그램이 실행되면, 프로세서는 운영체제의 제어에 따라 프로그램의 파일

로부터 프로그램 코드를 메모리에 로딩하도록 시뮬레이션 시스템을 제어할 수 있다. 이때 프로세서는 동역학 계산부(210) 및 결과 생성부(220) 각각에 메모리에 로딩된 프로그램 코드 중 대응하는 부분의 명령을 실행하여 이후 단계들(310 내지 320)을 실행하기 위한 프로세서의 서로 다른 기능적 표현들일 수 있다.

[0030] 단계(310)에서 동역학 계산부(210)는 다각형 메쉬를 이용하여 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 계산할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 그린 변형률 텐서(Green's strain tensor)를 제약 함수로 사용하여 각 다각형의 변형률을 계산할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 다각형 메쉬에서 LOD를 통해 굽힘 스프링 개수를 조절하여 옷감의 재질을 제어할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 다각형 메쉬에서 LOD를 통해 설정된 굽힘 스프링 구조를 생성하고, 생성된 굽힘 스프링 구조를 통해 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 옷감 메쉬의 에지 길이를 이용하여 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수를 탐색하고, 탐색된 제1 굽힘 스프링 개수에 기초하여 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수를 계산할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 고정된 노드에서 기 설정된 기준 이하의 레벨을 나타내는 제1 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가하고, 비고정된 노드에서 기 설정된 기준 이상의 레벨을 나타내는 제2 굽힘 스프링 개수만큼 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 목표치 레벨을 설정하고, 고정된 노드 또는 비고정된 노드에서 설정된 목표치 레벨에 기초하여 각 노드의 인접 노드에 굽힘 스프링을 추가할 수 있다. 동역학 계산부(210)는 다각형 메쉬를 구성하는 노드의 위치를 업데이트할 수 있다. 이때, 삼각형 메쉬일 수 있다.

[0031] 단계(320)에서 결과 생성부(220)는 계산된 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 생성할 수 있다.

[0032] 도 4는 일 실시예에 있어서, 굽힘 힘을 인장 크로스오버 스프링(tensile crossover springs)에 따라 계산하는 동작을 설명하기 위한 도면이다.

[0033] 변형률 기반 동역학은 위치 기반 동역학에 적용될 새로운 제약 조건을 제안할 수 있다. 시뮬레이션 시스템은 시뮬레이션 메쉬의 에지 방향에 상관없이 물체가 움직이는 방향의 변형률을 조절할 수 있도록 할 수 있다. 이 과정에서 두 정점 사이의 거리를 제약 조건으로 사용하는 것이 아닌, 그린 변형률 텐서(Green's strain tensor)를 제약 함수로 사용하며, 각 삼각형의 변형률을 다음과 같이 계산한다 (수식 1 참조).

[0034] 수학적식 1:

$$S = F^T F = Q^{-T} P^T P Q^{-1}$$

[0036] 여기서, P는 월드 공간에서의 변형을 나타내는 행렬이며, Q는 재질 위치 (Material position)를 나타내는 행렬이다. 수학적식 1에서 $P, Q \in R^{3 \times 2}$ 이기 때문에 Q^{-1} 가 존재하지 않는다. 이 문제를 피하기 위해 삼각형 텍스처 좌표를 이용하면 Q가 2×2 행렬이 돼서 Q^{-1} 를 계산할 수 있다.

[0037] 도 4를 참고하면, 굽힘 힘(Bending force)은 옷감의 뻣뻣함(Stiffness)을 제어하기 위해 많이 사용하는 방법이며, 삼각형 메쉬에서는 일반적으로 삼각형간의 접힘을 완화하기 위해 각도나 스프링 구조를 추가한다.

[0038] 많은 연구들에서 위 방법을 채용하고 있고, 질량-스프링 구조를 활용하는 방법들에서 안정적으로 실행된다. 하지만, 변형률 기반 동역학은 삼각형 기반에서 변형률을 계산하기 때문에 비정상적으로 늘어나는 경우에 시뮬레이션이 발산하거나 과한 변형률(Over-strain)에 의해 옷감 형태가 왜곡되는 문제가 발생한다(도 1 참조). 이러한 문제를 해결하기 위해, 실시예에서는 느슨한 레벨(Loose-level)을 나타내는 m^1 과 엄격한 레벨(Tight-level)을 나타내는 n^1 을 두어 고정된 노드와 그렇지 않은 노드를 처리할 수 있다.

[0039] 도 5는 일 실시예에 있어서, 적응적인 굽힘 스프링의 동작을 설명하기 위한 도면이다.

[0040] 도 5는 레벨 별 인접 노드의 구조를 나타낸 도면이다. 여기서, 빨간색 포인트는 고정된 노드, 보라색 포인트는 비고정된 노드를 의미한다. 상대적으로 삼각형의 변형률이 심하게 나타나는 고정된 노드들은 n^1 -ring 인접 노드 구조로 굽힘 스프링을 추가하고, 고정되는 않는 노드들은 m^1 -ring 인접 노드 구조로 연결한다. 여기서, $n^1 > m^1$ 이며, n^1 은 m^1 보다 커야 한다. 이렇게 만들어진 굽힘 스프링은 위치 기반 동역학을 기반으로 동역학을 계산하여 위치를 업데이트 한다.

[0041] 수학적식 2:

$$[0042] \quad \alpha(p + \Delta p) \approx \alpha(p) + \nabla_p \alpha(p) \cdot \Delta p = 0 \text{ (by Taylor)}$$

[0043] 여기서, Δp 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

[0044] 수학적식 3:

$$\begin{aligned} \Delta p &= -\frac{\alpha(p)}{\nabla_p \alpha(p)} = -\frac{\alpha(p)}{\nabla_p \alpha(p)} \cdot \frac{w}{w} \cdot \frac{\nabla_p \alpha(p)}{\nabla_p \alpha(p)} \left(\text{where } w = \frac{1}{m} \right) \\ &= -\frac{\alpha(p)}{|\nabla_p \alpha(p)|^2} \cdot w \cdot \nabla_p \alpha(p) \\ &= \lambda w \nabla_p \alpha(p) \left(\text{where } \lambda = -\frac{\alpha(p)}{w |\nabla_p \alpha(p)|^2} \right) \\ &= -s w \nabla_p \alpha(p) \left(\text{where } s = \frac{\alpha(p_1, \dots, p_N)}{\sum_i w_i |\nabla_{p_i} \alpha(p_1, \dots, p_N)|^2} \right) \end{aligned}$$

[0045]

[0046] 여기서, 투영에 의해 얻어진 변위(Displacement)는 다음과 같다.

[0047] 수학적식 4:

$$\begin{aligned} \Delta p_i &= -s k w_i \nabla_{p_i} \alpha(p_1, \dots, p_N) \\ (k : \text{stiffness param} \in [0, 1], w_i &= \frac{1}{m_i}) \end{aligned}$$

[0048]

[0049] 수학적식 5:

$$s = \frac{\alpha(p_1, \dots, p_N)}{\sum_j w_j |\nabla_{p_j} \alpha(p_1, \dots, p_N)|^2}$$

[0050]

[0051] 곱셈 스프링을 추가할 때 중요한 것은 n^l 과 m^l 의 값을 결정하는 것이다. 이 값들은 옷감의 해상도에 의존하기 때문에 실시예에서는 이 값을 자동으로 찾기 위한 방법을 제시한다. 우선, 옷감 메쉬의 에지 길이를 활용하여 느슨한 레벨을 나타내는 m^l 을 찾는다 (수식 6 참조).

[0052] 수학적식 6:

$$m^l = \max \left(\left(\frac{\Omega}{e_{avg}} \cdot 0.1 \right) + 1, 1 \right)$$

[0053]

[0054] 수학적식 7:

$$\Omega = \frac{\|AABB_{\min} - AABB_{\max}\|}{2} \cdot 0.5$$

[0055]

[0056] 수학적식 8:

$$n^l = 2m^l + 1$$

[0057]

- [0058] 여기서, e_{avg} 는 에지의 평균 길이이고, Ω 는 시뮬레이션 도메인의 크기로 입력 옷감 메쉬의 경계 상자를 기반으로 계산한다(수학식 7 참조). 이 값을 기반으로 엄격한 레벨을 나타내는 n^1 을 계산한다(수학식 8 참조). 이렇게 결정된 n^1 과 m^1 을 이용하여 적응형 굽힘 스프링이 추가될 수 있다. 앞에서 설명하였듯이 고정된 포인트는 n^1 을 이용하여 굽힘 스프링을 추가하고, 고정되지 않은 포인트는 m^1 을 이용하여 굽힘 스프링을 추가한다(도 5 참조). 실시예에서는 비정상적인 삼각형을 최소화하기 위해 고정시키는 단위는 i노드뿐만 아니라, i노드의 1-ring 인접 노드들도 고정시키도록 추가할 수 있다.
- [0059] 도 6은 일 실시예에 있어서, 굽힘 스프링의 LOD 기반 구조적 연결 동작을 설명하기 위한 도면이다.
- [0060] 앞에서 설명한 방법은 안정적으로 수행되지만, 고해상도 옷감 시뮬레이션이 되면 상대적으로 에지의 길이가 짧아지기 때문에 n^1 과 m^1 의 값이 커지게 되어 계산량이 증가된다. 이 값을 강제로 줄이게 되면 비정상적인 삼각형들로 인해 변형률이 기하학적으로 이상하게 표현된다. 이 문제를 완화하기 위해 LOD기반으로 굽힘 스프링을 연결하는 방식에 대해 소개한다. 도 5에서 보듯이, 너무 많은 스프링은 계산량이 증가될 뿐만 아니라, 오히려 옷감을 너무 뻣뻣하게 만든다. 이 문제를 해결하기 위해, 목표치 레벨 t^1 를 두어, 노드의 인접 노드가 t^1 -ring에 해당하는 노드만 이용하여 굽힘 스프링을 추가할 수 있다. 도 6은 실시예에서 제안하는 LOD기반 스프링 연결 기법을 보여주고 있으며, 여기서 $t^1 \in [n^1, m^1]$ 이다.
- [0061] 도 7은 일 실시예에 있어서, 인장 크로스오버 스프링과 실시예에서 제안된 방법 사이의 굽힘 힘의 비교 결과를 나타낸 도면이다.
- [0062] 실시예에서 제안된 방법의 결과들을 만들기 위해 실험한 환경으로 Intel Core i7-7700K CPU, 32GB RAM, Geforce GTX 1080Ti GPU가 탑재된 컴퓨터를 이용하였다. 실시예에서 제안된 방법의 우수성을 입증하기 위해 일반적인 옷감 시뮬레이션에서 많이 사용하는 굽힘 스프링 구조와 비교/실험될 수 있다.
- [0063] 도 7은 이전 기법과 실시예에서 제안된 방법을 비교한 결과이다. 도 7(a), 도 7(b)는 일반적으로 많이 사용하는 크로스 오버 에지 기법이며, 저해상도 옷감 시뮬레이션에서는 잘되는 것처럼 보이지만, 해상도가 증가하면 고정된 포인트들 주변에서 발생하는 비정상적인 변형률로 인해 불안정한 결과가 나타난다(도 7(a), 도 7(b)). 반면, 실시예에서 제안된 방법은 해상도와 관계없이 정상적인 옷감 형태를 잘 표현했으며, 해상도에 따라 뻣뻣함 정도가 변하지 않고 안정적으로 변형률 기반 동역학의 시뮬레이션 결과를 만들었다(도 7(c), 도 7(d) 참조).
- [0064] 이전 기법은 고정된 포인트 지점에서 과한 힘이 작용되고, 늘어나지 않으려면 제약조건 때문에 불안정성이 나타난다. 특히, 과한 외력에 비해 상대적으로 적은 개수의 제약조건 스프링은 이 문제를 더 악화시키고, 고해상도로 갈수록 심각해진다(도 7(b)와 도 1 참조). 이전 기법과 실시예에서 제안된 방법에서 외력에 대한 크기는 동일함에도 불구하고 안정성이 개선된 결과를 시각적으로 잘 보여주고 있다.
- [0065] 도 8은 일 실시예에 있어서, LOD 기반 굽힘 구조의 비교 결과를 나타낸 도면이다.
- [0066] 도 8은 LOD기반 굽힘 스프링 구조를 이용한 결과를 비교한 도면이다. LOD를 사용하지 않은 굽힘 스프링 구조와 LOD기반 굽힘 스프링 구조의 시각적 차이는 거의 발생하지 않았지만, 20% 적은 개수의 굽힘 스프링만을 사용하였다(도 8(b) 참조).
- [0067] 도 9는 일 실시예에 있어서, 실시예에서 제안된 방법으로 다양한 결과를 획득한 예이다.
- [0068] 도 9는 실시예에서 제안된 방법을 통해 다양한 삼각형 모델에 대해서 시뮬레이션 한 결과이다. 쿼드 형태의 옷감뿐만 아니라 다양한 형태에서 안정적으로 탄성 기반의 옷감 시뮬레이션을 잘 표현했다.
- [0069] 도 10은 일 실시예에 있어서, 실시예에서 제안된 방법으로 옷감의 재질을 변경한 예이다.
- [0070] 도 10은 실시예에서 제안된 방법을 이용하여 옷감의 재질을 변화시킨 결과이다. 비정상적인 변형률 없이 안정적으로 재질 변화 제어가 가능하기 때문에 가상 옷감을 사용하는 다양한 산업체에 활용이 가능할 것으로 기대한다.
- [0071] 실시예에서는 효율적이고 안정적으로 변형률 기반 동역학을 계산하기 위해서 새로운 굽힘 스프링 구조를 제안했다. 이 기법은 메쉬의 해상도에 따라 자동으로 굽힘 스프링 개수인 n^1 과 m^1 을 탐색하기 때문에 안정적으로 옷

감의 뽀뽀함을 표현할 수 있다. 뿐만 아니라, 이 값을 조절함으로써 옷감의 재질을 쉽게 제어할 수 있다.

[0072] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0073] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

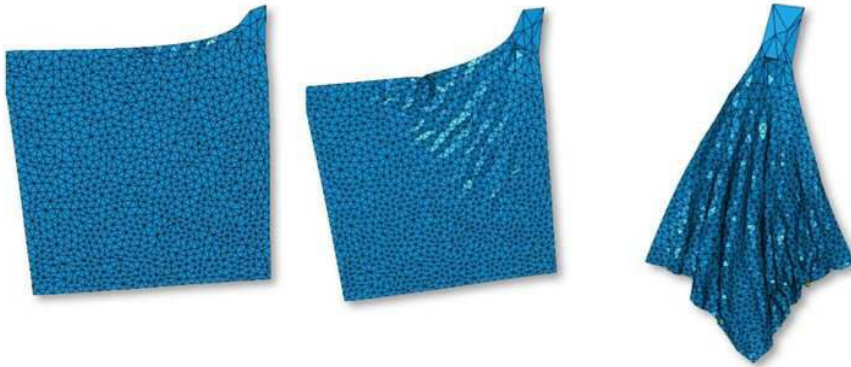
[0074] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0075] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

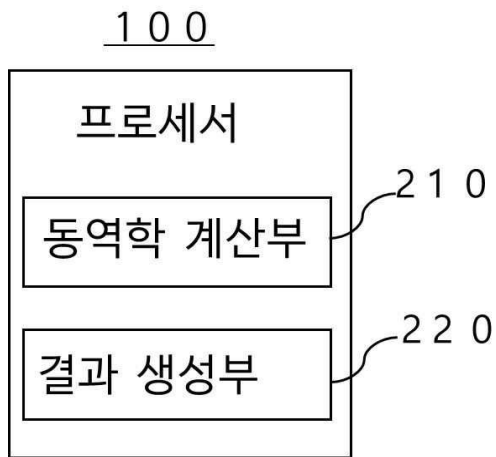
[0076] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

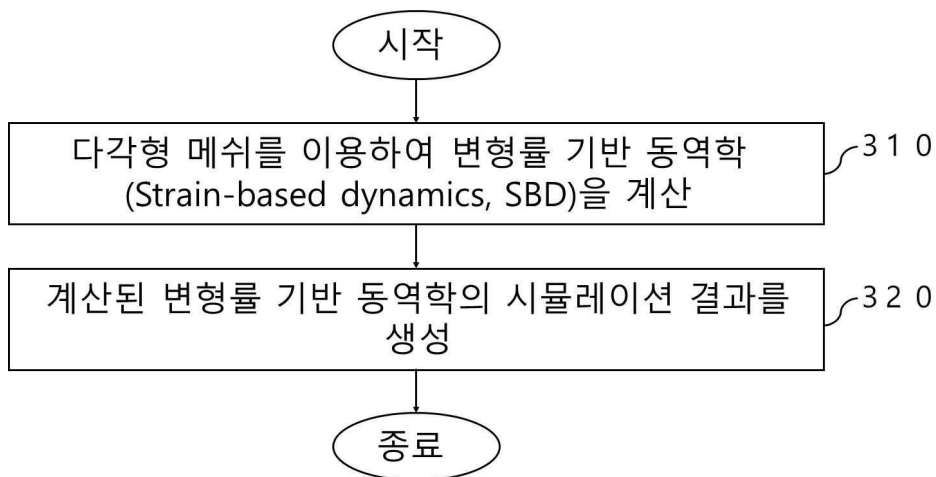
도면1



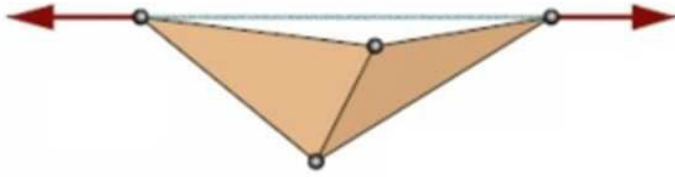
도면2



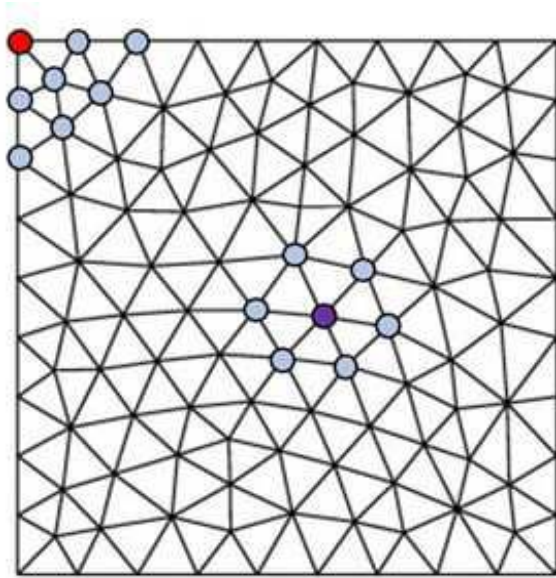
도면3



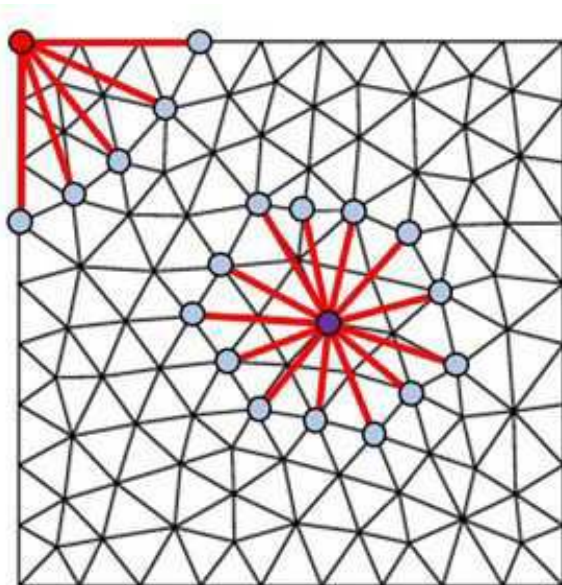
도면4



도면5



도면6



도면7



(a) Low resolution cloth



(b) Medium resolution cloth



(c) Low resolution cloth



(d) Medium resolution cloth

도면8

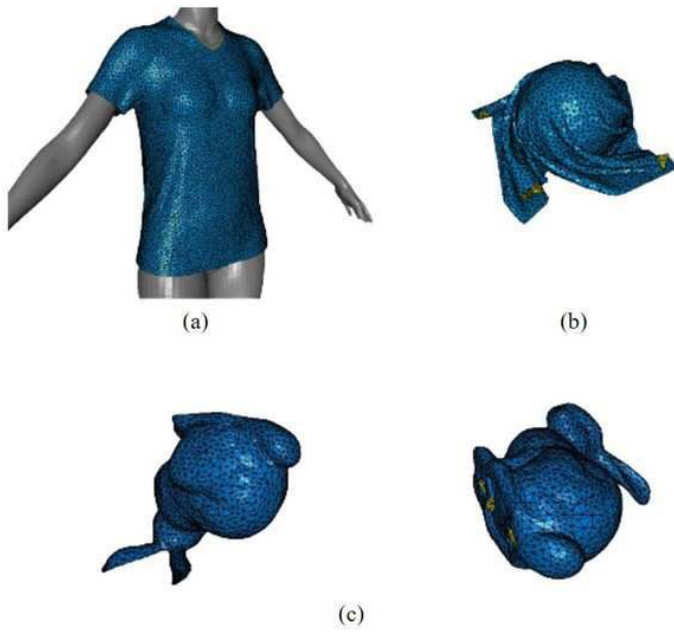


(a) Fully bending



(b) LOD-based bending

도면9



도면10

