

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2010-533335

(P2010-533335A)

(43) 公表日 平成22年10月21日(2010.10.21)

(51) Int.Cl.

G06F 19/00 (2006.01)

F 1

G06F 19/00 110

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 31 頁)

(21) 出願番号 特願2010-515980 (P2010-515980)
 (86) (22) 出願日 平成20年7月11日 (2008.7.11)
 (85) 翻訳文提出日 平成22年2月25日 (2010.2.25)
 (86) 国際出願番号 PCT/KR2008/004114
 (87) 国際公開番号 W02009/011527
 (87) 国際公開日 平成21年1月22日 (2009.1.22)
 (31) 優先権主張番号 11/777, 924
 (32) 優先日 平成19年7月13日 (2007.7.13)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 507171856
 ソウル ナショナル ユニバーシティー
 インダストリー ファンデーション
 大韓民国 151-818 ソウル クア
 ナックグ ボンチョンードン サン 4
 -2
 (74) 代理人 100074332
 弁理士 藤本 昇
 (74) 代理人 100114421
 弁理士 薬丸 誠一
 (74) 代理人 100114432
 弁理士 中谷 寛昭

最終頁に続く

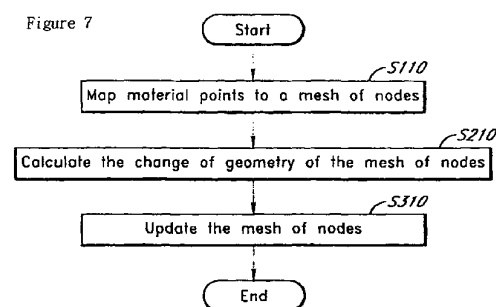
(54) 【発明の名称】 線形引張／剪断モデルを用いる衣服のシミュレーションの方法

(57) 【要約】

衣服内において生じる変形は、2つの成分、面内及び面外の変形に分解される。引張及び剪断は、面内変形であり、曲げは、面外変形である。この方法において、数値シミュレーションは、リアルタイムで実行可能であり、そして、モデルは、従来のリアルタイムモデルに存在する、アーチファクトの著しい減少につながる、いくつかの欠陥を解消する。エネルギー関数におけるは、力の関数行列式が一定になるように、全てのタイムステップで線形方程式の大きな系を解くことを取り除く、一定なベクトルについてに置換される。その方法は、エッジベースの及び三角形ベースの両方の系に関する単純化された物理モデルを使用する。

【選択図】 図7

Figure 7



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

線形引張／剪断モデルを使用する衣服のシミュレーションの方法であって、

a) 衣服のマテリアルポイント $P_1, \dots, P_N$ の配列情報をノードのメッシュ内にマッピングすること、ここで、Nは、マテリアルポイントの数であり、前記メッシュの i 番目のノードは、位置 x_i 、質量 m_i 、及び速度 v_i を有する、

b) 線形引張／剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することにより、ノードに適用される力に基づく多数の運動方程式を使用して複数のタイムステップでノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である、

c) メッシュノードの位置 x_i 及び速度 v_i をアップデートすること、

ここで、衣服の面内変形は、2つの近接するノードで定義されるエッジに従う引張によって表示され、2つの近接するノード i, j の運動方程式に関するエネルギー関数は、

各タイムステップの間に、 $E_{ij}^s = \frac{1}{2} k (x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ として近似され、

kはノード i と j を結合するばね定数、 $x_{ij} = x_j - x_i$ 及び x_{ij}^* は、各タイムステップで計算されるが、微分の際に一定とみなされるベクトルであり、運動方程式で使用される力の少なくとも一部は、エネルギー関数を微分することによって決定される、のステップを含む方法。

【請求項 2】

マテリアルポイントの配列の情報をマッピングすることは、

衣服上の複数のマテリアルポイントを選択すること、及び

複数のマテリアルポイントをノードのメッシュにマッピングすること、

を含む請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

メッシュは、標準三角形メッシュ及び標準矩形メッシュを含む請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

各タイムステップで、ノードのメッシュの配列の変化を計算することは、インプリシットオイラー法を使用する請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

ノードのメッシュの力学は $A \Delta v = b$ によって記述され、ここで、 A は $3N \times 3N$

行列であり、 b は $3N \times 1$ の力のベクトルであり、

$$A = \left(I - hM^{-1} \frac{\partial F}{\partial v} - h^2 M^{-1} \frac{\partial F}{\partial x} \right)$$

$$b = hM^{-1} \left(F^n + h \frac{\partial F}{\partial x} v^n \right)$$

の式が運動方程式 $M\ddot{x} = F$ に対応し、ここで、 M と F は $3N \times 3N$ 質量行列と $3N \times 1$ の力のベクトルである請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

Δv は、系の線形方程式を解くことによって得られ、行列反転がオフラインで一回だけ事前計算されるように、系の行列 A は時間について一定である請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

引張力がエネルギー関数の微分によって得られる請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

x_{ij}^* は、プレビアスディレクション法、

$$x_{ij}^* = L \frac{x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|}, \text{ ここで、 } L = |x_{ij}^*|,$$

10

によって与えられる請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

x_{ij}^* は、慣性エッジ回転、

$$x_{ij}^* = L \frac{R x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|},$$

20

によって与えられ、ここで、回転行列 R は、ロドリゲスの式 $h\omega = \theta \hat{\omega}$ によって、スカラー θ について計算され、ここで、 $\hat{\omega}$ は、 ω に従う単位ベクトルであり、増分回転 $h\omega$ に対応する R は、 $I + \sin \theta [\hat{\omega}] + (1 - \cos \theta) [\hat{\omega}]^2$ によって与えられ、ここで $[\hat{\omega}]$ は外積演算子 $\hat{\omega}_x$ を表示する交代行列である、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

ω は、慣性頂点移動、

30

$$\omega = \sum_{m=0}^M \alpha_m \omega^{n-m}, \text{ ここで、 } \alpha_m (m=0, \dots, M) \text{ は適合される定数、}$$

によって与えられる請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

x_{ij}^* は、

$$x_i^* = \sum_{m=0}^M \alpha_m x_i^{n-m}, \text{ 及び}$$

40

$$x_{ij}^* = L \frac{x_j^* - x_i^*}{|x_j^* - x_i^*|}, \text{ ここで、 } \alpha_m (m=0, \dots, M) \text{ は適合される定数、}$$

によって与えられる請求項 7 に記載の方法。

【請求項 12】

線形引張／剪断モデルを使用する衣服のリアルタイムシミュレーションの方法であって、

a) 衣服のマテリアルポイント $P_1, \dots, P_N$ の配列情報をノードのメッシュ内にマッピングすること、ここで、Nは、マテリアルポイントの数、前記メッシュの i 番目のノードは、位置 x_i 、質量 m_i 、及び速度 v_i を有する、

b) 線形引張／剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することにより、ノードに適用される力に基づく多数の運動方程式を使用して複数のタイムステップでノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である、

c) メッシュノードの位置 X_i 及び速度 v_i をアップデートすること、

ここで、衣服の面内変形は、 $u_i = [u_i v_i]^T$ 、 $u_j = [u_j v_j]^T$ 、及び $u_k = [u_k v_k]^T$ での、3つの近接する頂点の配置によって表示され、各タイムステップの間の、3つの近接するノード、i、j、kの運動方程式についてのエネルギー関数は、

$$E^{st} = \frac{1}{2} A \left\{ k_u |S_u - S_u^*|^2 + k_v |S_v - S_v^*|^2 \right\} \text{ 及び } E^{sh} = \frac{1}{2} A \left\{ k_{\tilde{u}} \left| \frac{S_u + S_v}{\sqrt{2}} - S_{\tilde{u}}^* \right|^2 + k_{\tilde{v}} \left| \frac{S_u - S_v}{\sqrt{2}} - S_{\tilde{v}}^* \right|^2 \right\}$$

を含み、

A 、 k_u 、 k_v は、変形していない状態における三角形の面積、 u - 及び v - の方向の剛性であり、3つの粒子で構成される三角形がマテリアル空間座標 $u_i = [u_i v_i]^T$ 、 $u_j = [u_j v_j]^T$ 、及び $u_k = [u_k v_k]^T$ を有し、ここで、 x_i 、 x_j 及び x_k は、3D直交座標空間位置に対応し、 S は、 $S(u, v)$ がマテリアルポイント (u, v) の3D位置を与えるように、3Dマテリアル空間から3D直交座標空間へのマッピングであり、 $\tilde{u}$ 及び $\tilde{v}$ は、 u 及び v の軸を+90度で回転させることによって得られる斜めの軸を表示し、 $k_{\tilde{u}}$ 及び $k_{\tilde{v}}$ は、 $\tilde{u}$ - 及び $\tilde{v}$ - の方向の剛性を表示し、ベクトル量 S_u^* 、 S_v^* 、 $S_{\tilde{u}}^*$ 及び $S_{\tilde{v}}^*$ は、各タイムステップで計算され、微分において一定とみなされる、のステップを含む方法。

【請求項13】

三角形が異なる引張及び剪断歪みを有していても歪みが各三角形で一定である請求項12に記載の方法。

【請求項14】

10

20

30

40

ベクトル量は、慣性軸回転、

$$\begin{aligned}
 S_u^* &= \tilde{S}_u^{n+1} / |\tilde{S}_u^{n+1}|, \\
 S_v^* &= \tilde{S}_v^{n+1} / |\tilde{S}_v^{n+1}|, \\
 S_{\bar{u}}^* &= \frac{S_u^* + S_v^*}{|S_u^* + S_v^*|}, \\
 S_{\bar{v}}^* &= \frac{S_u^* - S_v^*}{|S_u^* - S_v^*|}, \\
 \tilde{S}_u^{n+1} &= \frac{R(h\omega)S_u^n}{|S_u^n|}, \text{ and} \\
 \tilde{S}_v^{n+1} &= \frac{R(h\omega)S_v^n}{|S_v^n|},
 \end{aligned}$$

10

20

によって得られ、ここで、三角形は、 $[t^n, t^{n+1}]$ の短い期間の間に、慣性運動を生じることが仮定され、 S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} は、 $h\omega$ によって S_u^n 及び S_v^n を回転することによって得られる請求項12に記載の方法。

【請求項15】

回転行列Rは、ロドリゲスの式 $h\omega = \theta \hat{\omega}$ によってスカラー θ について計算され、ここで、 $\hat{\omega}$ は、 ω に従う単位ベクトル、そして、増分回転 $h\omega$ に対応するRは、 $I + \sin \theta [\hat{\omega}] + (1 - \cos \theta) [\hat{\omega}]^2$ によって与えられ、ここで、 $[\hat{\omega}]$ は、外積演算子 $\hat{\omega}_x$ を表示する交代行列である請求項14に記載の方法。

30

【請求項16】

ω は、

$$\omega = \sum_{m=0}^M \alpha_m \omega^{n-m},$$

ここで、 $\alpha_m (m=0, \dots, M)$ は適合される定数、によって与えられる請求項15に記載の方法。

40

【請求項17】

ベクトル量は、慣性頂点移動、

$$S_u^* = ax_i^* + bx_j^* + cx_k^*、及び$$

$$S_v^* = px_i^* + qx_j^* + rx_k^*、$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 p 、 q 及び r は適合される定数、によって与えられる請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 8】

10

x_i^* は、

$$x_i^* = \sum_{m=0}^M \alpha_m x_i^{n-m}、$$

ここで、 $\alpha_m (m=0, \dots, M)$ は適合される定数、によって与えられる請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

20

メッシュのノードについて、

位置制約、

方向制約、

混合制約、

静的な位置制約、

を操作することをさらに含む請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 2 0】

線形引張／剪断モデルを使用する衣服のシミュレーションの方法であって、

a) 衣服のマテリアルポイント $P_1, \dots, P_N$ の配列情報をノードのメッシュ内にマッピングすること、ここで、 N は、マテリアルポイントの数であり、前記メッシュの i 番目のノードは、位置 x_i 、質量 m_i 、及び速度 v_i を有する、

b) 線形引張／剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することにより、ノードに適用される力に基づく多数の運動方程式を使用して複数のタイムステップでノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である、

c) メッシュノードの位置 X_i 及び速度 v_i をアップデートすること、

d) 各ノードで、位置制約、方向制約、混合制約、及び静的な位置制約を操作すること、

ここで、衣服の面内変形は、2つの近接するノードで定義されるエッジに従う引張によって表示され、2つの近接するノード i, j の運動方程式に関するエネルギー関数は、

各タイムステップの間に、 $E_{ij}^s = \frac{1}{2} k (x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ として近似され、

k はノード i と j を結合するばね定数、 $x_{ij} = x_j - x_i$ 、及び x_{ij}^* は、各タイムステップで計算されるが、微分の際に一定とみなされるベクトルであり、運動方程式で 사용되는力の少なくとも一部は、エネルギー関数を微分することによって決定され、そして、

アップデートすること、及び操作することはリアルタイムで実行されるように構成される、のステップを含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、線形引張／剪断モデルを用いる衣服のシミュレーションの方法に関し、より詳細には、線形化されたエネルギー関数を用いる衣服のシミュレーションの方法に関する。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0002】

細部及びリアリズムを伴う十分なレベルの人間のアニメ化されたイメージを創り出すことが必要とされるとき、映画、アニメーション、ビデオゲーム、又はバーチャルリアリティ（VR）の別にかかわらず、衣服の動態的移動をシミュレートする問題が生じる。不運にも、服飾のアニメーションは、未だにアニメータにとってストレスのたまる仕事のままである。フラストレーションに関する大きな理由の1つは、10000のポリゴンの衣服一式の1分の長いアニメーションを創るために2、3日のシミュレーション時間がかかるということを含む、服飾のシミュレーションの計算の量についてである。品質を徹底的にあきらめない限り、シミュレーションの時間はリアルタイムからほど遠い。

【課題を解決するための手段】

【0003】

本発明の一態様は、エッジベースの線形引張及び剪断モデルを使用するシミュレーションの方法を提供する。その方法は、a) 衣服のマテリアルポイント $P_1, \dots, P_N$ の配列情報をノードのメッシュ内にマッピングすること、ここで、 N は、マテリアルポイントの数、して、前記メッシュの i -th (i 番目) のノードは、位置 X_i 、質量 m_i 、及び速度 v_i を有する、b) 線形引張/剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することにより、ノードに適用される力に基づく多数の運動方程式を使用して複数のタイムステップでノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である、c) メッシュノードの位置 x_i 及び速度 v_i をアップデートすること、ここで、衣服の面内変形は、2つの近接するノードで定義されるエッジに従う引張によって表示され、2つの近接するノード i, j の運動方程式に関するエネルギー関数は、各タイムステップの間に、 $E_{ij}^s = \frac{1}{2} k(x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ として近似され、 k はノード i と j を結合するばね定数、 $x_{ij} = x_j - x_i$ 及び x_{ij}^* は、各タイムステップで計算されるが、微分の際に一定とみなされるベクトルであり、運動方程式で使用する力の少なくとも一部は、エネルギー関数を微分することによって決定される、を含む。

【0004】

マテリアルポイントの配列の情報をマッピングすることは、衣服の複数のマテリアルポイントを選択すること、及び、複数のマテリアルポイントをノードのメッシュにマッピングすることを含む。メッシュは、標準三角形メッシュ及び標準矩形メッシュを含み得る。

【0005】

各タイムステップで、ノードのメッシュの配列の変化を計算することは、インプリシットオイラー法を使用し得る。ノードのメッシュの力学は、 $A\Delta v = b$ によって記述され、ここで、 A は $3N \times 3N$ 行列であり、 b は $3N \times 1$ のベクトルであり、 $A = \left(I - hM^{-1} \frac{\partial F}{\partial v} - h^2 M^{-1} \frac{\partial F}{\partial x} \right)$ 及び $b = hM^{-1} \left(F^n + h \frac{\partial F}{\partial x} v^n \right)$ は、運動方程式 $M\ddot{x} = F$ (M 及び F は $3N \times 3N$ 質量行列及び $3N \times 1$ の力のベクトルである) に対応する。 Δv は、線形方程式の系を解くことによって得られ、系の行列 A は、行列反転がオフラインで一回だけ予め計算されるように、経時的に一定である。

【0006】

引張力は、エネルギー関数の微分によって得られる。 x_{ij}^* は、プレビアスディレクション

法、 $x_{ij}^* = L \frac{x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|}$ 、ここで、 $L = |x_{ij}^*|$ 、によって与えられる。

10

20

30

40

50

【0007】

x_{ij}^* は、慣性エッジ回転、 $x_{ij}^* = L \frac{R x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|}$ 、ここで、回転行列 R は、ロドリゲスの式 $h\omega = \theta \hat{\omega}$ によってスカラー θ について計算され、 $\hat{\omega}$ は ω に従う単位ベクトルであり、そして、増分回転 $h\omega$ に対応する R は、 $I + \sin \theta [\hat{\omega}] + (1 - \cos \theta) [\hat{\omega}]^2$ 、ここで、 $[\hat{\omega}]$ は外積演算子 $\hat{\omega}_x$ を表示する交代行列、によって与えられる。 ω は、慣性頂点移動、 $\omega = \sum_{m=0}^M \alpha_m \omega^{n-m}$ 、ここで、 $\alpha_m (m=0, K, M)$ は適合される定数、によって与えられる。 x_{ij}^* は、 $x_i^* = \sum_{m=0}^M \alpha_m x_i^{n-m}$ 、及び $x_{ij}^* = L \frac{x_j^* - x_i^*}{|x_j^* - x_i^*|}$ 、ここで、 $\alpha_m (m=0, K, M)$ は適合される定数、によって与えられ得る。

10

【0008】

本発明のもう1つの態様は、三角形ベースの線形引張／剪断モデルを使用する衣服のシミュレーションの方法を提供する。その方法は、a) 衣服のマテリアルポイント $P_1, \dots, P_N$ の配列情報をノードのメッシュ内にマッピングすること、ここで、 N は、マテリアルポイントの数であり、 i 番目 (i^{th}) のノードは、位置 X_i 、質量 m_i 、及び速度 v_i を有する、b) 線形引張／剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することにより、ノードに適用される力に基づく多数の運動方程式を使用して複数のタイムステップでノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である、c) メッシュノードの位置 X_i 及び速度 v_i をアップデートすること、ここで、衣服の面内変形は、 $u_i = [u_i v_i]^T$ 、 $u_j = [u_j v_j]^T$ 、及び $u_k = [u_k v_k]^T$ での、3つの近接する頂点の配置によって表示され、各タイムステップの間の、3つの近接するノード、 i 、 j 、 k の運動方程式についてのエネルギー関数は、 $E^{st} = \frac{1}{2} A \left\{ k_u |S_u - S_u^*|^2 + k_v |S_v - S_v^*|^2 \right\}$ 及び $E^{sh} = \frac{1}{2} A \left\{ k_u \left| \frac{S_u + S_v}{\sqrt{2}} - S_u^* \right|^2 + k_v \left| \frac{S_u - S_v}{\sqrt{2}} - S_v^* \right|^2 \right\}$ を含み、 A 、 k_u 、 k_v は、変形していない状態

20

30

40

における三角形の面積、 u - 及び v -の方向の剛性であり、3つの粒子で構成される三角形がマテリアル空間座標 $u_i = [u_i v_i]^T$ 、 $u_j = [u_j v_j]^T$ 、及び $u_k = [u_k v_k]^T$ を有し、ここで、 x_i 、 x_j 及び x_k は、3D直交座標空間位置に対応し、 S は、 $S(u, v)$ がマテリアルポイント (u, v) の3D (3次元) 位置を与えるように、3Dマテリアル空間から3D直交座標空間へのマッピングであり、 $\tilde{u}$ 及び $\tilde{v}$ は、 u 及び v の軸を+90度で回転させることによって得られる斜めの軸を表示し、 $k_{\tilde{u}}$ 及び $k_{\tilde{v}}$ は、 $\tilde{u}$ - 及び $\tilde{v}$ -の方向の剛性を表示し、ベクトル量 S_u^* 、 S_v^* 、 $S_{\tilde{u}}^*$ 、及び $S_{\tilde{v}}^*$ は、各タイムステップで計算され、微分において一定とみなされる、を含む。

10

【0009】

三角形は、異なる引張及び剪断歪みを有するが、歪みは各三角形内で一定である。

【0010】

ベクトル量は、慣性軸の回転、 $S_u^* = \tilde{S}_u^{n+1} / |\tilde{S}_u^{n+1}|$ 、 $S_v^* = \tilde{S}_v^{n+1} / |\tilde{S}_v^{n+1}|$ 、 $S_{\tilde{u}}^* = \frac{S_u^* + S_v^*}{|S_u^* + S_v^*|}$ 、

20

$S_{\tilde{v}}^* = \frac{S_u^* - S_v^*}{|S_u^* - S_v^*|}$ 、 $\tilde{S}_u^{n+1} = \frac{R(h\omega)S_u^n}{|S_u^n|}$ 、及び $\tilde{S}_v^{n+1} = \frac{R(h\omega)S_v^n}{|S_v^n|}$ によって与えられ、三角形は、

$[t^n, t^{n+1}]$ の短い期間の間に、慣性移動を生じることが仮定され、 S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} は、 $h\omega$ による回転 S_u^n 及び S_v^n によって得られる。

【0011】

回転行列 R は、ロドリゲスの式 $h\omega = \theta \hat{\omega}$ によってスカラー θ について計算され、 $\hat{\omega}$ は、 ω に従う単位ベクトルであり、増分回転 $h\omega$ に対応する R は、 $I + \sin \theta [\hat{\omega}] + (1 - \cos \theta) [\hat{\omega}]^2$ によって与えられ、 $[\hat{\omega}]$ は、外積演算子 $\hat{\omega}_x$ を表示する交代行列である。 ω は、

30

$\omega = \sum_{m=0}^M \alpha_m \omega^{n-m}$ によって与えられ、ここで、 $\alpha_m (m=0, \dots, M)$ は、適合される定数である。

【0012】

ベクトル量は、慣性軸移動、 $S_u^* = ax_i^* + bx_j^* + cx_k^*$ 、及び $S_v^* = px_i^* + qx_j^* + rx_k^*$ によって与えられ、ここで、 a 、 b 、 c 、 p 、 q 及び r は、適合される定数である。

40

【0013】

x_i^* は、 $x_i^* = \sum_{m=0}^M \alpha_m x_i^{n-m}$ によって与えられ、ここで、 $\alpha_m (m=0, \dots, M)$ は、適合される定数である。

【0014】

方法は、さらに、メッシュの各ノード、位置制約、方向制約、混合制約、及び静的な位

50

置制約、について操作することをさらに含む。アップデートすること及び操作することは、リアルタイムで実行され得る。

【図面の簡単な説明】

【0015】

本発明の種々の態様及び有利性が、以下の添付の図面と併せて、以下の実施形態の記載から明確になり、容易に理解されるであろう。

【図1】図1は、本発明による衣服のシミュレーティングのための質量ばねモデルを例示する図である。

【図2】図2は、衣服のマテリアルポイントを表示するノードに関する矩形メッシュを例示する図であり、矩形メッシュは、四角形状を構成するためにそれぞれが近接するノードを伴う結合を有するノードを含む。

【図3】図3は、衣服のマテリアルポイントを表示するノードに関する三角形メッシュを例示する図であり、三角形メッシュは、三角形形状を構成するためにそれぞれが近接するノードを伴う結合を有するノードを含む。

【図4】図4は、従来技術による変位の方向変化の概算のための方法を例示する概略図である。

【図5】図5は、本発明の一実施形態による変位の方向変化を予測するための一次慣性エッジ回転法を例示する概略図である。

【図6】図6は、本発明のもう1つの実施形態による二次慣性頂点移動法を例示する概略図である。

【図7】図7は、本発明による一実施形態のプロセスを例示するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0016】

本発明の様々な態様は、衣服のシミュレーションの新たな技術を提供する。開示される技術は、以前のリアルタイムモデルにおいて存在するいくつかの欠陥を改善する。また、新たな技術は、いくつかの質と速度の二律背反を可能にし、拡張性の幅広い範囲を与える。それ故、本発明の技術は、ビデオゲームやVRシミュレーションのようなリアルタイムアプリケーションにおける即時の使用を提供する。また、これらの技術は、衣服のより正確なバージョンを作る前に、衣服アニメーションを下見するためのオフラインシステムにも組み入れられ得る。

【0017】

衣服を表示するための物理モデルは、エッジベースの系及びエリア（面積）ベースの系の2つに分類される。三角形ベースの系、エリアベースの系が、3つのノードによって定義される各三角形の面積変形に基づく面内変形を単位とするのに対して、エッジベースの系は、エッジの現在の長さに基づく面内変形を単位とする。本発明の実施形態は、エッジベースの系及びエリアベースの系における引張／剪断変形に関する線形化された物理モデルを提供する。

【0018】

シミュレーションにおいて、図1に示すように、衣服の一片は、N個の粒子（ $P_1, P_2, \dots, P_N$ ）12, 13, 14, 15, 16で表示される。各粒子の位置及び質量は、それぞれ x_i 及び m_i として示される。ベクトル x 、3N次元ベクトルは、 $x_1, x_2, \dots, x_N$ を結合することによって構成される。 x_i ($i = 1 \sim N$) は、時間 t によって変化する。位置及びベクトルが時間で変化していることから、それらは、 $x_i(t)$ 及び $x(t)$ として記述され得る。及び x^n は、n番目の離散タイムステップでの x_i 及び x の値である。また、表記法 $x_{ij} = x_j - x_i$ は、 x_i 及び x_j によって表示される位置を相互連結させるベクトルを表示するために使用される。 x_i 及び x_j によって表示される2つのノードで定義されるエッジは、 x_{ij} によって表示され得る。

【0019】

引張エネルギー及び引張力のエッジベースのフォーミュレーション

変形したエッジ x_{ij} で保たれる引張エネルギーは、以下の式でモデル化され得る。

10

20

30

40

50

$$E_{ij}^s = \frac{1}{2} k_{ij} (|x_{ij}| - L_{ij})^2 \quad (1)$$

【0020】

ここで、 L_{ij} 及び k_{ij} は、それぞれ、エッジの静止長及び剛性である。一旦エネルギーポテンシャルが定義されると、その後、エッジ x_{ij} から起因する P_i に作用する復元力は、エネルギーポテンシャルの空間導関数によって以下のように与えられる。

$$-\frac{\partial E_{ij}^s}{\partial x_i} = k_{ij} (|x_{ij}| - L_{ij}) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (2)$$

10

【0021】

上記は、マテリアルの復元傾向に起因し、そして、慣性力と呼ばれる。全ての近接するエッジから P_i に作用する復元力 f_i は、その総和によって以下のように与えられる。

$$f_i = \sum_{j \in N(i)} k_{ij} (|x_{ij}| - L_{ij}) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (3)$$

【0022】

ここで、 $N(i)$ は、 P_i が結合される粒子のインデックスの組である。

20

【0023】

エクスプリシットフォーミュレーション

粒子の力学的運動を見つけ出すために、粒子に作用する全ての力が必要とされる。内力に加えて、 P_i はまた、重力や空気抵抗のような外力を受ける。 P_i に作用する全ての外力の総和は、 f_i^{ext} として表示される。 F_i は、 P_i に作用する全ての内力及び外力の総和、すなわち、 $F_i = f_i + f_i^{ext}$ である。ニュートンの第2法則は、 P_i の運動が以下の方程式によって支配されることを記述する。

30

$$m_i \ddot{x}_i = F_i \quad (4)$$

【0024】

方程式4は、全ての（拘束されない）粒子について公式化され、それは、以下の微分方程式の系に組み入れられ得る。

$$M\ddot{x} = F \quad (5)$$

【0025】

40

ここで、 M 及び F は、それぞれ、 $3N \times 3N$ の質量行列及び $3N \times 1$ の力のベクトルである。上記の方程式を解くことは、時間で変化する粒子の軌道を与える。

【0026】

インプリシットフォーミュレーション

エクスプリシットフォーミュレーションは、直感的に思われる。さらに、それは、線形方程式の系を解くことを求めるものではなく、それ故、実行するために直接的なものである。しかしながら、エクスプリシットフォーミュレーションは、数値的不安定となる傾向がある。非常に小さなタイムステップが使用されない限り、系はしばしば発散する。以下に記載されるインプリシットフォーミュレーションは、より安定的なものとして知られている。

50

【0027】

方程式5において示すエクспリシットオイラー法との比較において、インプリシットオイラー法は、 t^{n+1} での導関数をサンプリングする。つまり、インプリシットオイラー法は、系の状態を以下の式によってアップデートする。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta v \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} v^n + \Delta v \\ M^{-1}F(x^n + \Delta x, v^n + \Delta v) \end{bmatrix} \quad (6)$$

【0028】

正確には、これにおける時間積分は、セミインプリシットオイラー法と呼ばれる。しかし、それは、インプリシット法として簡単に参照される。 10

【0029】

$F(x^n + \Delta x, v^n + \Delta v)$ における一次テイラー級数展開が以下の式を得るために適用される。

$$F(x^n + \Delta x, v^n + \Delta v) = F^n + \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial v} \Delta v$$

【0030】

上記を方程式6に代入して Δx を消去すると、以下の式ができる。

$$\left(I - hM^{-1} \frac{\partial F}{\partial v} - h^2 M^{-1} \frac{\partial F}{\partial x} \right) \Delta v = hM^{-1} \left(F^n + h \frac{\partial F}{\partial x} v^n \right) \quad (7) \quad 20$$

【0031】

今、その方程式は、 Δv について解かれ、そしてその結果は、 $\Delta x = v^n + \Delta v$ を計算するために使用され得る。上記の方程式において、以下の方程式となる。

$$A = \left(I - hM^{-1} \frac{\partial F}{\partial v} - h^2 M^{-1} \frac{\partial F}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$b = hM^{-1} \left(F^n + h \frac{\partial F}{\partial x} v^n \right) \quad (9) \quad 30$$

【0032】

それは、方程式7が以下の式として記載されるようにするためである。

$$A \Delta v = b \quad (10)$$

【0033】

ここで、「A」は $3N \times 3N$ 行列であり、「b」は $3N \times 1$ のベクトルである。エクспリシット法と比較すると、方程式10からの Δv の計算は、線形方程式の大きな系を解くことを求める。引張／剪断モデルは、系の行列Aを時間に対して一定にする。その後、その行列変換は、オンラインシミュレーションが高速で実行され得るように、オフラインで一回だけ予め計算され得る。 40

【0034】

上記のスピードアップは、単純化された（精度の低い）物理モデルを採用することの結果であり、詳細は後で記載されるであろう。インプリシットフォーミュレーションとの関係で行列Aが一定になるということを生じる引張モデルは、以下に記載されるDesbrun et al. 参照文献[11]によって既に開示されている。それらの単純化は、明らかにアーチ 50

ファクト (artifacts) となる回転運動を見逃すことに基づいていた。それらからのモデルの相違は、単純化が、回転運動のせいであるということである。結果として、開示されるその方法は、顕著に改良された結果をつくり出すことができる。

【0035】

過去数十年にわたる様々なグループの先駆的な研究、以下にまた記載される [4]、[2]、[13]、[8]、[1]、[5]、[3] のおかげで、衣服は、今、驚異的なリアルリズムでシミュレートされ得る。例えば、自然な皺は、今、粒子モデルを使用して創り出されることが可能であり、そして、衣服のシミュレーションにおける衝突処理の構造安定性は、かなり改善された。アニメーションの質において行われた改良にしたがって、全体のシミュレーションアルゴリズムは、相応な速度で作動するように改善された。例えば、約 10000 個の粒子で表示される衣服一式の 30 秒の長いアニメーションを創り出すことは、従来技術において、レンダリングのための時間を除いて 2、3 日かかる。

【0036】

しかしながら、シミュレーション速度がより速くなるべきいくつかのアプリケーション分野が存在する。例えば、ビデオゲームにおいて、衣服のアニメーションは、リアルタイムで生成されるべきである。Desbrun、Schroder、及び Barr 参照文献 [11] は、衣服のような対象物のリアルタイムシミュレーションの問題を先駆的に解決した。セミインプリシット法を加速するために、彼らは、非線形の力の成分を省略し、そして、一定の系の行列に起因する力の関数行列式を計算することにおいて、線形成分だけを使用した。それ故、一旦、反転された系の行列が初期段階で事前計算されると、線形系は、全てのタイムステップで解かれる必要がなくなった。非線形成分の省略は、不自然な結果 (アーチファクト) に導かれ得る。無視された非線形の力からの可能性のあるエラーを補償するために、角運動量補正ステップが、各タイムステップのシミュレーションの終わりで採用される。しかし、それらのステップは、完全に問題を解決できるわけではない。補正ステップが広範囲の角運動量を維持することができたとしても、それらは、局所の角運動量を維持することはできなかった。物理モデルはまた、系の行列を一定にする。しかし、非線形の力は、関数行列式の計算において、全く見落とされていない。

【0037】

Kang、Choi、及び Cho 参照文献 [10]、[9] はまた、反転されたヘッシアン行列を事前計算する、又は、大きな線形の系を解くことを回避するセミインプリシット法の単純化を開示した。O(n) 時間コストを達成するために、各衣服粒子の速度変化が、結合される近くの粒子の明確に概算された将来の速度を使用して直接アップデートされる。

【0038】

最近、Cordiner 及び Thalmann は、参照文献 [7] において、リアルタイムの衣服のアニメーションシステムを示した。彼らは、衣服の運動パターンに基づいて、衣服を 3つのカテゴリ (タイト、ルース、フローティング) に分類し、そして、それらを各カテゴリにおいてアニメートするための異なるアプローチを採用した。タイト/ルース範囲の運動は、体の動きに高く依存し、そしてそれ故、そのような範囲が、フル 3D (3次元) シミュレーションを必要とし得ない。幾何学的技術が、タイト及びルースな範囲のために使用された。一方で、セミインプリシット法を伴う粒子系は、フローティング範囲に使用された。フローティング範囲が、普通の衣服における小さな部分だけを持ち上げるということから、上記の技術は、リアルタイムアニメーションを達成できた。

【0039】

エッジベースの線形引張モデル

エッジベースの系は、面内変形が、エッジに沿う引張によって現実化する衣服の質量ばね表示 (図 1 参照) を参照する。基本の変形可能な単位はエッジである。引張エネルギー関数は、復元力及び力の関数行列式が導き出されるように、2つの粒子 P_i 及び P_j の間のエッジに関して開示される。それは、メッシュの限られた部分だけ (すなわちエッジだけ) に着目することによって変形を判断することから、位相结合性が全てのエッジで同じに維持されるときに、エッジベースの系は、より意味のあるものになる。それ故、エッジベー

スの系は、図 2 に示されるように、標準のメッシュに関してほとんど採用される。衣服のシミュレーションについて考えられる 2 種類の標準のメッシュ、図 3 に示すような標準三角形メッシュ、及び、図 2 に示されるような標準矩形メッシュがある。矩形メッシュが使用されるとき、剪断変形が、対角（斜め）結合を行うことによって、上記のエッジベースの引張モデルを使用してシミュレートされ得る。

【 0 0 4 0 】

従来の引張モデル

引張力及びその関数行列式は、エネルギー関数から導かれる。そのため、一定な系を導く物理モデルを開発する手間が、そのような単純化する特性を有する新たなエネルギー関数を見つけるということに対して軽減される。従来のエネルギー関数の導関数は以下の通りである。

10

$$E_{ij}^s = \frac{1}{2} k (|\mathbf{x}_{ij}| - L)^2 \quad (11)$$

【 0 0 4 1 】

これは以下の式をつくる。

$$\mathbf{f}_i = \sum_{j \in N(i)} k (|\mathbf{x}_{ij}| - L) \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} \quad (12)$$

【 0 0 4 2 】

20

この式は $\mathbf{x}_i$ 又は $\mathbf{x}_j$ に関して線形ではない。それ故、力の関数行列式 $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}$ は、時間について一定ではない。それから、方程式 10 において与えられる線形の系は、全ての時間ステップで解かれるべきである。

【 0 0 4 3 】

もし、標準の演算子 $|\cdot|$ がなかった場合、 $\mathbf{f}_i$ は線形となるであろう。そのため、問題は、「標準演算子であるがその値が方程式 11 のそれに近い使用を取り除くエネルギー関数を見つけることができるか？」として換言される。

【 0 0 4 4 】

引張モデル

使用されるエネルギー関数は以下の通りである。

30

$$E_{ij}^s = \frac{1}{2} k (\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{x}_{ij}^*) \cdot (\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{x}_{ij}^*) \quad (13)$$

【 0 0 4 5 】

ここで、 $\mathbf{x}_{ij}^*$ は、各タイムステップで新たに計算されるが、微分のときに一定と見なされるいくつかのベクトルである。エネルギーには、標準演算子がない。それ故、力の関数行列式 $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}$ は、今、一定である。

40

【 0 0 4 6 】

持ち上がる即座の問いは、上記のエネルギー関数の使用が、許容可能な衣服の引張挙動を創り出すために、ベクトル量 $\mathbf{x}_{ij}^*$ が存在し得るかどうか？ということである。その答えは、実験を通じてイエスであることがわかっている。

【 0 0 4 7 】

それから、 x_{ij}^* についてどの値が使用されるのか？ 物理的な意味で方程式 1 3 を方程式 1 1 に合わせるために、理想的には、 x_{ij}^* は、引張のないバージョンの x_{ij} を表示すべきである。その状態は、条件 $|x_{ij}^*| = L$ 及び $x_{ij}^* \parallel x_{ij}$ 、ここで、 $\parallel$ は「平行」を意味する、として表現され得る。方程式 1 3 は、 x_{ij} の値を、 x_{ij}^n から x_{ij}^{n+1} にアップデートするために使用されている。それ故、第 2 の条件がより明確に $x_{ij}^* \parallel x_{ij}^{n+1}$ として表現され得る。ここで、問題は、 x_{ij}^{n+1} が未知であるということである。この問題を回避するための 1 つの方法は、 x_{ij}^{n+1} の推定される方向を使用することである。

10

【 0 0 4 8 】

Desbrun et al. 参照文献 [1 1] は、「（我々は）回転を見逃すように簡単に決断し、そして、この非線形部分が一定のままであると考え」と述べる。本発明の実施形態の表記において、決定は、 x_{ij}^{n+1} の推定の方向について、 $x_{ij}^n / |x_{ij}^n|$ を使用することになる。それ故、決定は、以下の式を使用することに等しい。

20

$$x_{ij}^* = L \frac{x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|} \quad (14)$$

【 0 0 4 9 】

このスキームは、プレビースディレクション法として参照される。図 4 に例示されるプレビースディレクション法において、 x_{ij}^* は x_{ij}^n に平行である。前のステップの方向を使用することは欠陥である。スキームは、シミュレートされた衣服が、 x_{ij} の古い（全体の）方向を維持する傾向を示すという副作用を生み出し、その作用は、時間に応じて蓄積し得る。この副作用は、小さなタイムステップが使用されたときでさえ持続する。彼らは、角運動量の保存を強要するためにとられる手順を開示する。しかしながら、その手順によって保存されるのは、全体の系の角運動量である。局部での角運動量は保存されず、それは、シミュレートされた結果の視覚リアリズムについてより重要なものである。

30

40

【 0 0 5 0 】

x_{ij}^* を推定するための 2 つの方法がある。1 つは、慣性エッジ回転と呼ばれ、他方は、慣性頂点移動と呼ばれる。これらの方法の両方は、上記の種類の欠陥を有していない。タイムステップが、小さく十分にとられるとき、それらの方法は、特定の副作用の影響を受けない。

50

【 0 0 5 1 】

慣性エッジ回転：慣性エッジ回転（IER）方法の原理的な考えは、 t^n で x_{ij} の角速度 ω に基づいて、 x_{ij}^{n+1} の方向を予測することである。 x_{ij} は、図5に示すように、期間 h に関して角速度で回転し続けるであろうということが仮定されている。回転行列 R は、 $[t^n, t^{n+1}]$ の間に起こる推定された増分の方向変化を表示する。それから、その方法は、以下の式により x_{ij}^* を計算する。

10

$$x_{ij}^* = L \frac{R x_{ij}^n}{|x_{ij}^n|} \quad (15)$$

【 0 0 5 2 】

R の計算は、ロドリゲスの式によって行われる。それは、いくらかのスカラー θ について $h\omega = \theta\hat{\omega}$ 、ここで、 $\hat{\omega}$ は、 ω に従う単位ベクトルである、として記述され得る。その後、増分の回転 $h\omega$ に対応する回転行列 R は、 $I + \sin\theta[\hat{\omega}] + (1 - \cos\theta)[\hat{\omega}]^2$ 、ここで、 $[\hat{\omega}]$ は、外積演算子 $\hat{\omega}_x$ を表示する交代行列である、によって与えられる。

20

【 0 0 5 3 】

最後に、角速度 ω が推定されることが必要になる。もし、 x_{ij}^{n-1} と x_{ij}^n の間の角度が、 $\angle(x_{ij}^{n-1}, x_{ij}^n)$ として示されるならば、角速度は t^n での ω^n は、以下の式で近似される。

$$\omega^n = \frac{\angle(x_{ij}^{n-1}, x_{ij}^n)}{h} \frac{x_{ij}^{n-1} \times x_{ij}^n}{|x_{ij}^{n-1} \times x_{ij}^n|} \quad (16)$$

30

【 0 0 5 4 】

同様に、 t^{n-1} での角速度 ω^{n-1} は、以下の式で近似される。

$$\omega^{n-1} = \frac{\angle(x_{ij}^{n-2}, x_{ij}^{n-1})}{h} \frac{x_{ij}^{n-2} \times x_{ij}^{n-1}}{|x_{ij}^{n-2} \times x_{ij}^{n-1}|} \quad (17)$$

【 0 0 5 5 】

40

今、 t^{n+1} での角速度 ω が推定される。一次予測を使用して、 ω が以下の式によって計算される。

$$\omega = \omega^n \quad (18)$$

【 0 0 5 6 】

二次予測を使用して、 ω は以下の式によって計算される。

$$\omega = \omega^n + (\omega^n - \omega^{n-1}) = 2\omega^n - \omega^{n-1} \quad (19)$$

【 0 0 5 7 】

または、より一般的な二次予測を使用して、 ω は以下の式によって計算される。

50

$$\omega = \alpha \omega^n + \beta \omega^{n-1} \quad (20)$$

【 0 0 5 8 】

ここで、 α と β は、適合される定数である。 ω の一般的な高次のエクスプリシット予測は、以下の式で行われ得る。

$$\omega = \sum_{m=0}^M \alpha_m \omega^{n-m} \quad (21)$$

【 0 0 5 9 】

ここで、 α_m ($m = 0, \dots, M$) は適合される定数である。

10

【 0 0 6 0 】

方程式 1 5 を方程式 1 3 に代入し、 x_{ij}^* を微分において定数とみなすと、引張力は、今、 x に対して線形である。それ故、方程式 7 における $\partial F / \partial x$ は一定である。ダンピングを表示するために使用される従来のモデルは、既に、 v に関して線形である。それ故、 $\partial F / \partial v$ もまた一定である。それ故、全体の系の行列 A は一定である。

【 0 0 6 1 】

今まで見落とされていた 1 つの問題は、 x_{ij}^* を微分において一定として取り扱うことが、アーチファクトに通じ得るということである。IER 方法を伴う実験は、その方法が時折、振動を生じる結果を生み出すということを示す。 x_{ij}^* の値において大きな変動があったときに、アーチファクトがより顕著になるであろうということが予想される。以下に記載される慣性頂点移動法は、そのような態様においてより安定したものである。

20

【 0 0 6 2 】

2) 慣性反転移動： x_{ij}^* を推定するためのもう 1 つの方法、慣性頂点移動 (IVT) が与えられる。IER との大きな相違点は、エッジが慣性運動をつくっているということを仮定する代わりに、IVT は、各頂点移動が独立しているとみなす。頂点移動についての特定の情報がないうきに、図 6 に示すように、各頂点が、慣性運動をつくるということが仮定され得る。

30

【 0 0 6 3 】

IVT 法は、最初に、 x_i^{n+1} の推定位置 x_i^* を、それが慣性運動をつくっているという仮定することによって計算する。例えば、一次推定は、以下の式によって行われ得る。

40

$$x_i^* = x_i^n + (x_i^n - x_i^{n-1}) = 2x_i^n - x_i^{n-1} \quad (22)$$

【 0 0 6 4 】

しかし、より一般的な一次推定は、以下の式で行われ得る。

$$x_i^* = \alpha x_i^n + \beta x_i^{n-1} \quad (23)$$

【0065】

ここで、 α 及び β は適合される定数である。二次推定が以下のように行われ得る。

$$x_i^* = x_i^n + (x_i^n - x_i^{n-1}) + \frac{1}{2}(x_i^n - 2x_i^{n-1} + x_i^{n-2}) \quad (24) \quad 10$$

【0066】

しかし、より一般的な二次推定は以下のように行われ得る。

$$x_i^* = \gamma x_i^n - \delta x_i^{n-1} + \lambda x_i^{n-2} \quad (25)$$

【0067】

ここで、 γ 、 δ 及び λ は、適合される定数である。一般的な高次の推定は以下の式で行われ得る。

$$x_i^* = \sum_{m=0}^M \alpha_m x_i^{n-m} \quad (26) \quad 20$$

【0068】

ここで、 α_m ($m = 0, \dots, M$) は適合される定数である。

【0069】

I V T 法（I E R 法と比較される）の原理的な考えは、新たな頂点位置を推定するための特定のスキーム内になく、しかし、頂点を自由に移動する粒子として取り扱うということにある。

【0070】

もう1つの実施形態において、 x_{ij}^* は以下の式で推定され得る。

$$x_{ij}^* = L \frac{x_j^* - x_i^*}{|x_j^* - x_i^*|} \quad (27) \quad 30$$

【0071】

I V T 法が使用されるとき、振動を生じるアーチファクトは、I E R 法と比較して軽減される。その現象は、二次推定が使用されるときに、より重要である。

【0072】

剪断及び曲げ変形の表示

エッジベースの系についての線形引張モデルが使用された。衣服を表示することにおいて、他の2種類の変形、剪断と曲げもまた考えられる。

【0073】

矩形メッシュにおいて、剪断変形は、上記において、対角結合をつくることによって表されるモデルで表示され得る。矩形メッシュにおいて剪断変形を表示するために、開示されるモデルは、特に適切なものではない。しかしながら、三角形メッシュは、本質的に、メッシュ構造それ自体によって剪断変形から戻る傾向を有している。これは、モデルがオリジナルに生まれる傾向ではないという副作用である。三角形メッシュにおいて、剪断変形を明確に表示するために、三角形ベースの線形引張／剪断モデルにおいて表される技術が使用され得る。

40

50

【0074】

曲げは、そのモデルで明確に表示されない。しかしながら、不規則な三角形メッシュが使用されるとき、どのような特定の曲げモデルを導入することなしでさえ、シミュレートされた結果は、曲げ変形からの復元の傾向を示すであろう。それは、衣服一式の曲げ剛性による（参照文献[12]）。再び、それは、そのモデルがオリジナルに生じる傾向ではないという副作用である。この副作用は、曲げ変形が明確にシミュレートできないときのような場合に、有益に取り扱われ得る（リアルタイムアプリケーションにおいて、衣服のシミュレーションのために割り当てられる計算が通常制限される）。この副作用を有益に取り扱うということにおける興味深い態様は、メッシュの不規則性が有益であるということである。

10

【0075】

衣服のシミュレーションに割り当てられ得る計算が極めて不十分であるとき、その後、エッジベースの線形引張モデルは、剪断又は曲げ変形を明確にモデリングすることなく、不規則な三角形メッシュに採用され得る。モデルにおいてはばねだけがエッジで、線形ばねである。エッジベースの線形引張モデルにおけるモデルの副作用は、剪断／曲げ変形を表示するために信頼され得る。その三角形のネットワークはその本質から、剪断変形から復元するための傾向を生じる。メッシュの不規則性は、曲げ変形から復元するための傾向を生じるであろう。そのため、線形引張モデルを不規則な三角形メッシュに適用することによって、剪断及び曲げ挙動は、副産物として得られる。その結果は、物理的に正確ではないが、速度が最大の問題であるときに、リアルタイムシステムを実行することにおいて有用となり得る。オフラインシステム内でも、もう1つの拡張可能なオプションを加える。エッジベースの線形引張モデルを上記に使用することは、単純であるが、衣服の非常に高速な表示となる。

20

【0076】

三角形ベースの線形引張／剪断モデル

三角形ベースの系は、面内変形が3つ頂点の配置によって実現する衣服の相互粒子表示を参照する。基本の変形単位は三角形である。 P_i 、 P_j 及び P_k によって構成される三角形についての引張及び剪断エネルギー関数は、復元力及び力の関数行列式がそれから導かれるように開示される。それは、エッジにただ着目するのではなく、その（三角形の）エリアに着目することによって変形を判断することから、三角形ベースの系は、メッシュの不規則性に対して感受性が低い。エッジベースの線形引張モデルとの顕著な相違は、三角形ベースのモデルにおいて、剪断変形に起因し得るということである。

30

【0077】

3D空間マッピングSに対するマテリアル空間

3つの粒子で構成される三角形において、それらの空間座標は、 $u_i = [u_i v_i]^T$,
 $u_j = [u_j v_j]^T$, $u_k = [u_k v_k]^T$ であり、そして、対応する3D直交座標空間位置は、それぞれ、
 x_i 、 x_j 、 x_k である。もし、Sが3Dマテリアル空間から3D直交座標空間へのマッ
 ピングである場合、 $S(u,v)$ は、マテリアルポイント (u,v) の3D位置を与える。仮定を単
 純化することは、三角形が異なる引張及び剪断歪みを有する場合でさえも、その歪みが
 各三角形内において一定であるということである。上記の仮定の単純化の下で、空間導
 関数 $S_u = \frac{\partial S}{\partial u}$ 及び $S_v = \frac{\partial S}{\partial v}$ が、 u_i 、 u_j 、 u_k 、 x_i 、 x_j 、 x_k に関して以下の式で表現
 される。

$$\begin{bmatrix} S_u & S_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j - x_i & x_k - x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_j - u_i & u_k - u_i \\ v_j - v_i & v_k - v_i \end{bmatrix}^{-1} \quad (28)$$

【0078】

上記の方程式の注目すべき結果は、 S_u と S_v の両方が、以下のような x_i 、 x_j 、 x_k の
 線形結合であるということである。

$$S_u = ax_i + bx_j + cx_k \quad (29)$$

$$S_v = px_i + qx_j + rx_k \quad (30)$$

【0079】

ここで、 a 、 b 、 c 、 p 、 q 及び r は、マテリアル空間内における（変形していない）
 トライアングライゼーション（triangulization）から決定される。

【0080】

従来の引張及び剪断モデル

前に開示された三角形ベースのモデルにおいて、引張エネルギーを表示するために一般に
 使用された式は参考文献[1]であり、以下の通りである。

$$E^{\text{sr}} = \frac{1}{2} A \{ k_u (|S_u| - 1)^2 + k_v (|S_v| - 1)^2 \} \quad (31)$$

【0081】

10

20

30

40

ここで、 A 、 k_u 、 k_v は、(変形していない状態における) 三角形の面積であり、それぞれ、 u -及び v -の方向の剛性である。剪断エネルギーについては、いくつかの研究グループは、以下の式を使用した。

$$E^{sh} = \frac{1}{2} A k_{sh} (S_u \cdot S_v)^2 \quad (32)$$

【0082】

10

そして、グループ [6] は以下の式を使用した。

$$E^{sh} = \frac{1}{2} A \{k_{\tilde{u}}(|S_{\tilde{u}}|-1)^2 + k_{\tilde{v}}(|S_{\tilde{v}}|-1)^2\} \quad (33)$$

【0083】

ここで、 $\tilde{u}$ 及び $\tilde{v}$ は、 u 及び v の軸を +90 度で回転することによって得られ、 $k_{\tilde{u}}$ 及び $k_{\tilde{v}}$ は、 $\tilde{u}$ - 及び $\tilde{v}$ -の方向の剛性を表示する。上記の式のいずれもが、系の行列を一定にすることはない。

20

【0084】

引張及び剪断モデル

エネルギー関数は以下の通りである。

$$E^{st} = \frac{1}{2} A \{k_u |S_u - S_u^*|^2 + k_v |S_v - S_v^*|^2\} \quad (34)$$

$$E^{sh} = \frac{1}{2} A \left\{ k_{\tilde{u}} \left| \frac{S_u + S_v}{\sqrt{2}} - S_{\tilde{u}}^* \right|^2 + k_{\tilde{v}} \left| \frac{S_u - S_v}{\sqrt{2}} - S_{\tilde{v}}^* \right|^2 \right\} \quad (35)$$

30

【0085】

ここで、方程式 29 及び 30 で与えられる線形結合が、 S_u 及び S_v について使用される。各タイムステップで供給され、そして、微分において一定とみなされるベクトル量 S_u^* 、 S_v^* 、 $S_{\tilde{u}}^*$ 及び $S_{\tilde{v}}^*$ をどのように計算するかはまだ記載されていない。しかし、この瞬間に 1 つの事柄、フォーミュレーションが、系の行列を一定にすること、が明らかである。今、即座の問いは、上記のエネルギー関数が許容できる衣服の引張及び剪断挙動を創り出すような、ベクトル量 S_u^* 、 S_v^* 、 $S_{\tilde{u}}^*$ 及び $S_{\tilde{v}}^*$ が存在するかどうかということである。エッジベースの系において、その答えはイエスであり、推定を行う 2 つの方法、慣性軸回転及び慣性頂点移動、が存在する。

40

【0086】

1) 慣性軸回転：原理的には、 S_u^* 及び S_v^* は、引っ張られていないバージョンの S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} をそれぞれ表示すべきである。 S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} が利用できないことから、それらの推定が使用される。 $\tilde{S}_u^{n+1}$ 及び $\tilde{S}_v^{n+1}$ が S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} の推定を示す。一実施形態において、引っ張られていないバージョンは、以下のように計算され得る。

$$S_u^* = \tilde{S}_u^{n+1} / |\tilde{S}_u^{n+1}| \quad (36)$$

$$S_v^* = \tilde{S}_v^{n+1} / |\tilde{S}_v^{n+1}| \quad (37)$$

【0087】

同様に、 S_u^* 及び S_v^* は、原理的に、引っ張られていないバージョンの S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} をそれぞれ表示する。 S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} を $\tilde{S}_u^{n+1}$ 及び $\tilde{S}_v^{n+1}$ としてそれぞれ表記することで、 S_u^* 及び S_v^* は以下のように計算され得る。

$$S_u^* = \tilde{S}_u^{n+1} / |\tilde{S}_u^{n+1}| \quad (38)$$

$$S_v^* = \tilde{S}_v^{n+1} / |\tilde{S}_v^{n+1}| \quad (39)$$

【0088】

より単純な $S_{\#}^*$ 及び $S_{\#}^*$ を計算する方法は、それらが単に S_u^* 及び S_v^* に垂直であると仮定することである。この仮定の下で、以下の式が使用され得る。

$$S_{\#}^* = \frac{S_u^* + S_v^*}{|S_u^* + S_v^*|} \quad (40)$$

$$S_{\#}^* = \frac{S_u^* - S_v^*}{|S_u^* - S_v^*|} \quad (41)$$

【0089】

推定 $\tilde{S}_u^{n+1}$ 、 $\tilde{S}_v^{n+1}$ 、 $\tilde{S}_u^{n+1}$ がどのように行われるのかが以下に記載される。推定 $\tilde{S}_u^{n+1}$ 及び $\tilde{S}_v^{n+1}$ は、同様な方式で $\tilde{S}_u^{n+1}$ 、 $\tilde{S}_v^{n+1}$ として実行され得る。 $\tilde{S}_u^{n+1}$ 及び $\tilde{S}_v^{n+1}$ を推定する方法が記載される。

【0090】

10

20

30

40

$[t^n, t^{n+1}]$ の短い期間に、三角形が慣性運動を行うと仮定することで、 S_u^n 及び S_v^n を $h\omega$ で回転することによって、 S_u^{n+1} 及び S_v^{n+1} が予測でき、すなわち、 $\tilde{S}_u^{n+1}$ 及び $\tilde{S}_v^{n+1}$ は、以下によって計算され得る。

$$\tilde{S}_u^{n+1} = \frac{R(h\omega)S_u^n}{|S_u^n|} \quad (42)$$

10

$$\tilde{S}_v^{n+1} = \frac{R(h\omega)S_v^n}{|S_v^n|} \quad (43)$$

【0091】

ω の推定は、エッジベースの線形引張モデルにその手順を導入することによって行われ得る。

【0092】

2) 慣性頂点移動：衣服の移動についての以前の情報がなにもないときに、実行すべきもう1つの妥当な仮定は、頂点が慣性移動をつくるであろうということである。エッジベースの線形引張モデルに導入される同じ手順が、の予測される位置を得るために適用され得る。その後、それらの線形結合が方程式29及び30によって以下の推定をつくるために採用される。

20

$$S_u^* = ax_i^* + bx_j^* + cx_k^* \quad (44)$$

$$S_v^* = px_i^* + qx_j^* + rx_k^* \quad (45)$$

【0093】

本発明の実施形態は、以下を与える。

【0094】

30

1) エッジベースの系についての線形化可能なエネルギー関数：エッジの面内引張エネルギーを形式化するために、それは、 $(x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ を使用するために開示され、ここで、 x_{ij}^* は各タイムステップで供給され、微分において一定とみなされる同じ値である。衣服のシミュレーションの従来のフォーミュレーションは、項目 $(|x_{ij}| - C)^2$ 、 x_{ij} について非線形である導関数を含む。それは、線形方程式の大きな系を解くことを求める。線形化のために、 $(|x_{ij}| - C)^2$ を $(x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ で置換することが開示される。

40

【0095】

2) 方程式15によって x_{ij}^* を計算する、エッジベースの系において x_{ij}^* を推定するための慣性エッジ回転法。

【0096】

3) ω のエキスプリシット予測：予測のために方程式18～21を使用することが開示される。

【0097】

50

4) 頂点を自由に移動する粒子として取り扱う、エッジベースの系において x_{ij}^* を推定するための慣性頂点移動法。その方法は、方程式 2 7 によって x_{ij}^* を計算する。

【0 0 9 8】

5) x_i^* のエクスプリシット予測：予測のために方程式 2 2 ～ 2 6 を使用することが開示される。

【0 0 9 9】

10

6) 剪断変形又は曲げ変形又はその両方が明確にモデル化されないままで、衣服を表示するために、エッジベースの線形引張モデルを使用すること：それは、純粋な質量一ばねモデルである。その副作用は、剪断及び／又は曲げ変形からの復元について依存する。この単純なモデルを使用することの主要な利益は、そのスピードアップである。

【0 1 0 0】

7) 三角形ベースの系についての線形化可能なエネルギー関数：三角形の面内の引張及び剪断エネルギー関数を形式化するために、方程式 3 4 及び 3 5 を使用することが開示される。

【0 1 0 1】

20

8) S_u^* 、 S_v^* 、 S_h^* 、 S_v^* を方程式 3 6 ～ 4 1 によって計算する、上記の三角形ベースの線形引張／剪断モデルについて、 S_u^* 、 S_v^* 、 S_h^* 、 S_v^* を推定するための慣性軸回転法。

【0 1 0 2】

9) S_u^* 、 S_v^* 、 S_h^* 、 S_v^* を方程式 4 4 及び 4 5 によって計算する、上記の三角形ベースの線形引張／剪断モデルの系について、 S_u^* 、 S_v^* 、 S_h^* 、 S_v^* を推定するための慣性頂点移動法。

【0 1 0 3】

30

本発明の一態様は、図 7 に例示されるように、線形引張及び剪断モデルを使用して、衣服のリアルタイムシミュレーションの方法を提供する。その方法は、a) 衣服のマテリアルポイント $P_1 \dots P_N$ の配列の情報をノードのメッシュにマッピングすること、ここで、 N は、マテリアルポイントの数であり、前記メッシュの i 番目のノードは位置 x_i 、質量 m_i 及び速度 v_i を有する (S 110)、b) 線形引張及び剪断モデルを各メッシュノードの移動及び回転に適用することによって、ノードに適用される力に基づいて、多くの方程式を使用して、複数のタイムステップで、ノードのメッシュの配列の変化を計算すること、ここで、方程式の数は、 $3N$ 以下である (S 210)、c) メッシュノードの位置 x_i 及び速度 v_i をアップデートすること、ここで、衣服の面内変形は、2つの近接するノードによって定義されるエッジに沿って引張によって表示される (S 310)、を含み、2つの近接するノード i, j の運動方程式のエネルギー関数は、各タイムステップの間に、 $E_{ij}^s = \frac{1}{2} k(x_{ij} - x_{ij}^*) \cdot (x_{ij} - x_{ij}^*)$ で近似され、 k は、ノード i 及び j に結合するばね定数であり、 $x_{ij} = x_j - x_i$ 及び x_{ij}^* は、各タイムステップで計算され、微分のときに一定とみなされるベクトルであり、運動方程式において使用される力の少なくとも一部は、エネルギー関数を微分することによって決定される。

【0104】

エネルギー関数において、 $(x - x^*) \cdot (x - x^*)$ は、 $(|x| - C)^2$ の代わりに使用され、ここで、 x^* は、各タイムステップで供給される値である。 x^* は、さらなる微分において一定とみなされる。 x^* を計算することは、衣服が慣性運動をつくるという仮定を単純化することに基づく。 x^* の計算のための他の方法が使用され得る。

【0105】

本発明の様々な実施形態が示されそして記述されたが、この実施形態において、本発明の原理及び思想、請求項及びその等価物において定義される範囲を逸脱することなく変更が行われ得るということが当業者に理解されるであろう。

【0106】

この出願は、ここで、参照によって以下の書類及び刊行物をその全体において組み入れる。

【0107】

[1] David Baraff 及び Andrew Witkin. 「Large steps in cloth simulation. In Proceedings of SIGGRAPH 98, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 43-54. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1998」

【0108】

[2] David E. Breen, Donald H. House, 及び Michael J. Wozny. 「Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In Proceedings of SIGGRAPH 94, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 365-372. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, July 1994」

【 0 1 0 9 】

[3] Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw, 及び John Anderson. 「Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation. In John Hughes, editor, SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 594-603. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2002」

【 0 1 1 0 】

[4] Michel Carignan, Ying Yang, Nadia Magnenat-Thalmann, 及び Daniel Thalmann. 「Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. In Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 92), pages 99-104. ACM, July 1992」

【 0 1 1 1 】

[5] Kwang-Jin Choi 及び Hyeong-Seok Ko. 「Stable but responsive cloth. In John Hughes, editor, SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 604-611. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2002」

【 0 1 1 2 】

[6] Kwang-Jin Choi 及び Hyeong-Seok Ko. 「Extending the immediate buckling model to triangular meshes for simulating complex clothes. In Eurographics 2003, short paper, 2003」

【 0 1 1 3 】

[7] Frederic Cordiner 及び Nadia Magnenat-Thalmann. 「Real-time animation of dressed virtual humans. In Eurographics 2002, 2002」

【 0 1 1 4 】

[8] Frederic Cordiner 及び Nadia Magnenat-Thalmann. 「Real-time animation of dressed virtual humans. In Eurographics 2002, 2002」

【 0 1 1 5 】

[9] Young-Min Kang 及び Hwan-Gue Cho. 「Bilayered approach for efficient animation of cloth with realistic wrinkles. In Computer Animation 2002, 2002」

【 0 1 1 6 】

[1 0] Young-Min Kang, Jeong-Hyeon Choi, Hwan-Gue Cho, 及び Chan-Jong Park. 「Fast and stable animation of cloth with an approximated implicit method. In Computer Graphics International, pages 247-256, 2000」

【 0 1 1 7 】

[1 1] Mark Meyer, Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, 及び Alan H. Barr. 「Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality. Journal of Visualization and Computer Animation (JVCA), 2000」

【 0 1 1 8 】

[1 2] P. Volino 及び N. Magnenat-Thalmann. 「Implementing fast cloth simulation with collision response. In Proceedings of the Conference on Computer Graphics International (CGI-00), pages 257-268, June 19-24 2000」

【 0 1 1 9 】

[1 3] Pascal Volino, Martin Courshesnes, 及び Nadia Magnenat Thalmann. 「Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. In Proceedings of SIGGRAPH 95, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 137-144. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, August 1995」

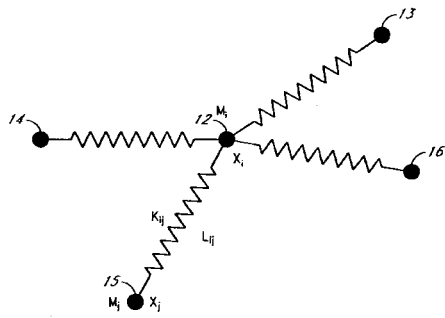
10

20

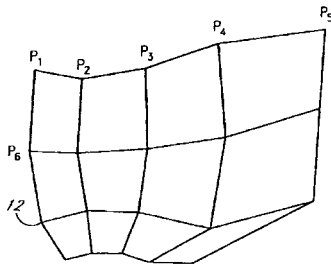
30

40

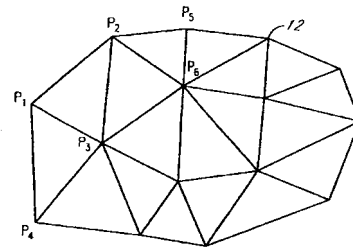
【図 1】



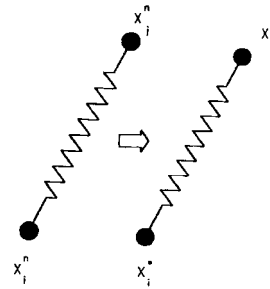
【図 2】



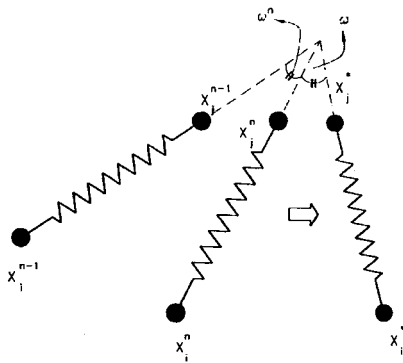
【図 3】



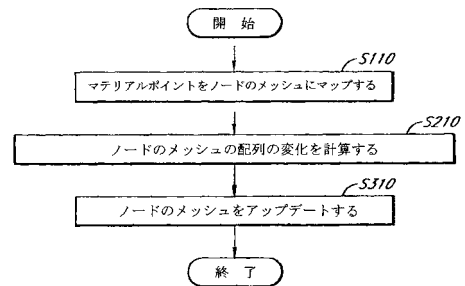
【図 4】



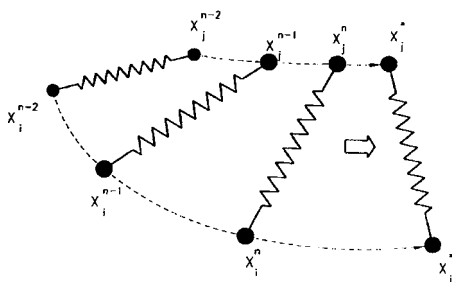
【図 5】



【図 7】



【図 6】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/KR2008/004114
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G06T 17/10(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 8 G06T		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean Utility models and applications for Utility models since 1975 Japanese Utility models and applications for Utility models since 1975		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKIPASS, SEARCH TERMS: CLOTH, SIMULATION, MESH, and similar terms		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2005-197731 A1 (JEONG-HWAN AHN et al.), 08 September 2005 See abstract, page1, paragraph[0010]-page2, paragraph[0017]	1-20
A	JP 2002-056405 A (SHIMA SEIKI MFG), 22 February 2002 See abstract, page3, paragraphs [0007]-[0016]	1-20
A	US 006968297 B1 (ZIAKOVIC MICHEL et al.), 22 November 2005 See abstract	1-20
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 24 DECEMBER 2008 (24.12.2008)		Date of mailing of the international search report 24 DECEMBER 2008 (24.12.2008)
Name and mailing address of the ISA/KR  Korean Intellectual Property Office Government Complex-Daejeon, 139 Seonsa-ro, Seo-gu, Daejeon 302-701, Republic of Korea Facsimile No. 82-42-472-7140		Authorized officer SHIN, Jae Chul Telephone No. 82-42-481-8215 

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/KR2008/004114

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2005-197731 A1	08.09.2005	CN 1661633 A	31.08.2005
		EP 1569172 A2	31.08.2005
		EP 1569172 A3	04.10.2006
		EP 1569172 A2	31.08.2005
		JP 2005-243034	08.09.2005
		JP 2005-243034 A	08.09.2005
		KR 10-2005-0087689	31.08.2005
JP 2002-056405 A	22.02.2002	NONE	
US 006968297 B1	22.11.2005	CA 2354708 A1	19.04.2001
		CA 2354708 C	19.04.2001
		DE 60007720 D1	19.02.2004
		DE 60007720 T2	13.01.2005
		EP 1137349 A1	04.10.2001
		EP 1137349 B1	14.01.2004
		ES 2214324 T3	16.09.2004
		FR 2799556 B1	25.01.2002
		JP 2003-511576	25.03.2003
		JP 2003-511576 T	25.03.2003
		WO 01-26496 A1	19.04.2001

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW

(72)発明者 コ, ヒョンーソク

大韓民国 151-744 ソウル市, グワナクーグ シンリム９ードン, エス. エヌ. ユー.

(72)発明者 チョイ, クワンジン

大韓民国 135-893 ソウル市, ガンナムーグ シンサードン 592-11 サムウォン
ビー／ディー 3F