

関節構造を持つ3次元弾性物体モデルの提案

Proposal of Elastic Model for 3D Object with Articulated Structure

渡辺 隆史*1 大谷 淳*1 棚沢 順*2,*1 徳永 幸生*3
Takafumi WATANABE Jun OHYA Jun KURUMISAWA Yukio TOKUNAGA

1. まえがき

関節構造を持たせることで、低い計算コストで複雑な形状の再現や複雑な挙動が可能となる3次元の多関節弾性物体モデルの提案を行う。今まで提案されてきた多くの弾性物体モデルは、弾性物体を単一のオブジェクトとして扱っている。そのため、複雑な形状の弾性物体をシミュレーション可能なモデルは提案されているものの[1]、その挙動は単純なものに限られる。それに対して提案手法では、複数の弾性物体を接合することで、関節構造を持たせる。このことで、計算コストの削減と、単一の弾性物体ではできないような複雑な挙動の再現が可能となる。

弾性物体に関節構造を持たせるために、始めにインバースキネマティクス (IK) によりボーンの状態を求め、次にボーンへ弾性物体を付加する。このとき、ボーンの高さを物理計算により伸縮させることで、接合された複数の弾性物体は、全体が弾性物体のように挙動する。

ただし、IK には、ボーンの端の座標を予め決定しておかなければならないという欠点がある。この欠点を補うため、多関節弾性物体に外骨格を与え、外骨格の状態からボーンの端の座標を求める。外骨格に弾性物体を用いることで、多関節弾性物体は弾性物体として自然な挙動をする。

実験により、2次元だけでなく[2]、3次元の多関節弾性物体に対しても、滑らかな変形の挙動が可能で、十分な計算速度が得られることを示す。また、外骨格を持たせることで、複数の端点を持つ多関節物体に対しても、自然な挙動を再現できることを示す。

2. 多関節弾性物体の構築

多関節弾性物体を構築するために、はじめに IK を行う。IK には複数の方法が提案されており、どの方法でも提案手法を利用することはできるが、本論文では CCD (Cyclic Coordinate Descent) 法[3]を用いている。

IK によりボーンの状態を求めた後、ボーンの伸縮を行う。伸縮の計算では、ボーンの各関節点に対して運動方程式を立てる。関節点には、2種類の力がはたらくとする。

1つ目は、ボーンの高さに依存する力とする。i 番目の関節点の座標を X_i 、ボーンの高さを L_i 、ボーンの高さを l_i とする。α 及び β は任意の定数として、関節点にはたらく力は次の式で求める。

$$F_{li} = \alpha(L_i - l_i)(X_{i-1} - X_i) + \beta(L_{i+1} - l_{i+1})(X_{i+1} - X_i) \quad (1)$$

2つ目は、ボーンの高度に依存する力とする。関節点に隣接するボーンの高さを θ_i 、安定する高さを θ_0 とし、また、隣接するボーンが作る平面において、i 番目のボーン

の法線ベクトルを N_i とすれば、高度に依存する力は、次の式で求まる。ただし、γ 及び η は任意の定数とする。

$$F_{\theta i} = \gamma(\theta_i - \theta_0)N_i + \eta(\theta_i - \theta_0)N_{i+1} \quad (2)$$

次に、伸縮させたボーンに対して、弾性物体を付加する。弾性物体のシミュレーション法として、境界要素法を用いる[4]。境界要素法は、安定した変形結果を得やすく、条件によっては低い計算コストでシミュレーションすることが可能である。境界要素法の弾性物体のシミュレーションでは、弾性物体の各頂点に対し、変位が未知で表面力が既知の境界条件か、変位が既知で表面力が未知の境界条件を与え、シミュレーションによって未知の値を求める。

境界要素法には重要な性質として、シミュレーション結果に平行移動は含まれるが回転は含まれない性質がある。そこで、弾性物体の回転はボーンの状態から求める。これにより、弾性物体はボーンに付加されたような変形をする。

図1左のように、ボーンと弾性物体の座標系を与えられたとする。このとき、ボーンを IK および運動方程式の計算により運動させ、図1右の状態になったとする。この場合、弾性物体の座標系もボーンの回転に従い、図1右のように回転させる。弾性物体の境界条件は図1左のように、他の弾性物体との接合点には変位が既知の境界条件を与え、他の点には変位が未知の境界条件を与える。弾性物体との接合点では、境界要素法のシミュレーションによって、その点にはたらく力が求まる。そこで、その力を使い運動方程式を立て、接合点を運動させる。

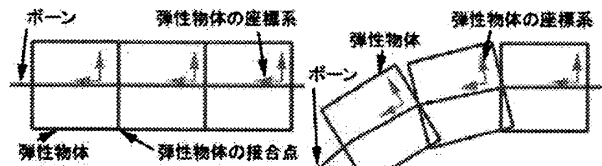


図1 ボーンの状態と弾性物体の座標系の関係

3. 外骨格の形成

IK を用いる場合、ボーンの高度の座標は固定するなどして予め与えておかなければならない。通常、マウスで操作する場合を考えると、操作できる点は1点だけである。ボーンを多分岐させた場合、1点を除いて固定して置かなければならない状況は、多関節弾性物体の挙動に対して大きな制限となる。そこで、多関節弾性物体をさらに弾性物体で囲み、外骨格を形成することで同時に複数のボーンを制御する方法を提案する。

外骨格は、計算コストを低くするため少数の頂点で構成する。そして、外骨格の頂点の座標からボーンの高度の座標を与える(図2)。外骨格となる弾性物体のシミュレーションには境界要素法を利用し、すべての頂点で変位が既知の境界条件を与える。この場合、境界要素法のシミュレ

*1 早稲田大学 Waseda University
*2 千葉商科大学 Chiba University of commerce
*3 芝浦工業大学 Shibaura Institute of Technology

ーションによって、各頂点にはたらく表面力が求まるので、各頂点に対して求めた表面力から運動方程式を立てることで、外骨格のアニメーションが可能になる。

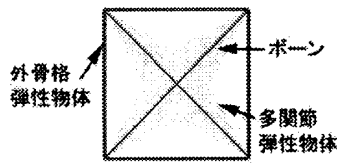


図2 外骨格を持った多関節弾性物体モデル

4. シミュレーション結果

頂点数 82 の円柱型の弾性物体を、提案モデルに従って複数接合し、多関節弾性物体を構築した結果が図3である。

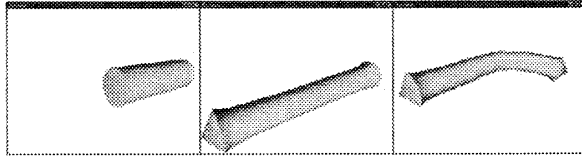


図3 円柱型弾性物体を7個つなげた場合

図3では、円柱型弾性物体を7個接合した。オブジェクト全体が滑らかにアニメーション可能である。

円柱型の弾性物体を複数接合した場合の frame rate が表1である。表1の頂点数とポリゴン数は、円柱同士が接合されることで、頂点の重なりやポリゴンが隠れることを考慮に入れた、多関節弾性物体の実質的な値となっている。

実験環境は、OS Windows XP(32bit), CPU Pentium4 650 (3.4GHz), GPU NVIDIA Geforce 6800GT、使用言語に VisualStudio.NET 2003 C#および DirectX9.0 SDK を使用した。ただし、Hyper-Threading や SSE などの特殊な命令は使用していない。

表1 多関節弾性物体の計算速度

円柱数	頂点数	ポリゴン数	frame rate(fps)
30	1938	3872	58.3
40	2578	5152	38.9
50	3218	6432	29.6
70	4498	8992	22.7
100	6418	12832	14.7

表1から頂点数 2000 程度でもリアルタイム(60fps)で計算が可能で、比較的複雑なオブジェクトに対しても、リアルタイムで処理できることがわかる。図4, 5は外骨格を持った多関節弾性物体のシミュレーション結果を示している。外骨格として頂点数 26 の立方体型の弾性物体を利用した。

図4, 図5では、5つの円柱型弾性物体を接合して構築した多関節弾性物体を、図4は、外骨格の重心から各頂点へ、図5は、各頂点を結ぶように配置した。

外骨格を持たせたことで、1つの頂点を操作しただけで変形や衝突のシミュレーションが可能である。また、多関節弾性物体全体のアニメーションも、自然な挙動が可能であることを確認できた。

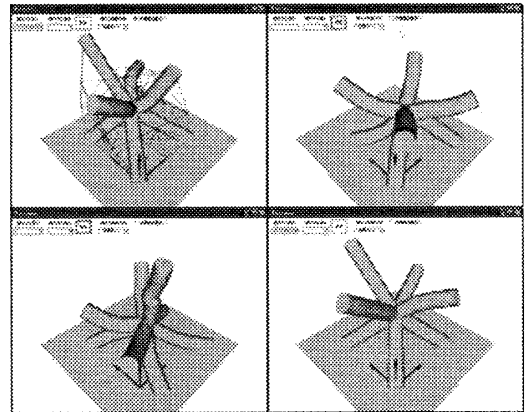


図4 外骨格を持った円柱数40の多関節弾性物体

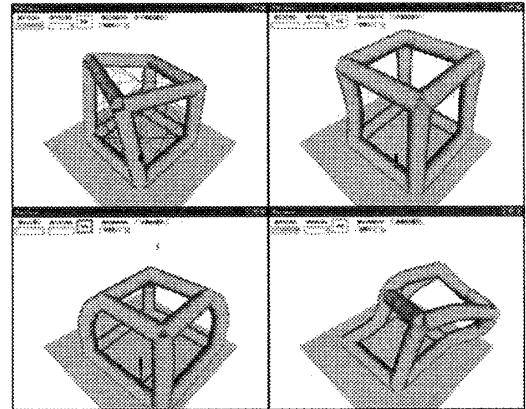


図5 外骨格を持った円柱数60の多関節弾性物体

5. むすび

複数の弾性物体を接合することで、関節構造を持たせた多関節弾性物体モデルを提案した。IKの利用、及び、境界要素法を効率よく計算できる条件作り出すことで、多くの頂点を持つ物体に対してもリアルタイムで計算ができ、単一の弾性物体ではできないような複雑な挙動も再現できる。

さらに、外骨格を持たせることで、複数の端点を持つ多関節弾性物体の変形や衝突が可能である。

また、多関節弾性物体における各弾性物体の変形は、独立に行っているため、並列計算が可能であり、将来主流になると考えられているマルチコア CPU にも対応できる。

今後は、より複雑な運動の制御法の検討をしていく。

参考文献

- [1] Steve Capell, Seth Green, Brian Curless Tom Duchamp, Zoran Popović, "A Multiresolution Framework for Dynamic Deformations", Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation.
- [2] 渡辺隆史, 大谷淳, 糊沢順, 徳永幸生, "逆運動学による弾性物体の多関節モデルの検討", 2005年電子情報通信学会総大会, D-12-77, pp.227.
- [3] Damian Merrick, Tim Dwyer, "Skeletal Animation for the Exploration of Graphs", invis.au 2004, 61-70.
- [4] Doug L.James, Dinesh K.Pai, "ARTDEFO: Accurate real time deformable objects", SIGGRAPH 99, pp.65-72.