

3次元メッシュモデルとその運動による4次元メッシュモデルの生成

北海道大学 ○小友 活, 小野里 雅彦, 田中 文基

要 旨

本研究では, 3次元メッシュモデルに対して時間変化のオペレーション(運動)を与えることにより, 4次元メッシュモデルを生成することを行った。従来の3次元ボクセルの時系列データを入力とした手法よりも, 高速に4次元モデルを生成することが可能となった。

1 はじめに

これまでの3次元モデルを扱う多くのアプリケーションは, ある時刻ごとの3次元モデルの状態を時系列に並べることや, 異なる時刻に存在する3次元モデルの状態間を内挿するなどして3次元モデルの時間変化の情報を提示してきた(図1(a)-(c))。しかし, これは3次元モデルの時間変化を連続的かつ明示的に扱えていない。従って, 時間の情報を含む4次元時空間の構造を記述するため, 4次元メッシュモデル(図1(d))とそのモデリングシステムが提案されている[1]。このシステムは3次元ボクセルモデル時系列データより4次元モデルを生成することや, 4次元モデルの3次元空間への投影や断面抽出を行うことができる。しかしながら高解像度のボクセルモデルはメモリ使用量が大きく, その時系列データから4次元モデルを生成する処理は時間がかかる。従って本研究では4次元モデルを生成する新たな手法として, 3次元メッシュモデルと時間変化のオペレーション(運動)を入力とする手法を提案する。

2 4次元メッシュモデル

本研究において用いる4次元空間は3次元空間と時間により定まる4次元ユークリッド空間 R^4 である。

4次元空間において, 最も単純な多面体状の胞である四面体により, 4次元形状の境界を構成するモデルを4次元メッシュモデルと定義する。3次元の多面体を交差する平面によって切断した時の断面形状が多角形であるように, 4次元メッシュモデルを交差する3次元空間によって切断した時の断面形状は3次元メッシュモデルとして抽出できる。

3 3次元メッシュモデルとその運動による4次元メッシュモデル生成の手法

3.1 提案手法の流れ

本研究では, 3次元メッシュモデルと4次元空間内における移動方向と移動量を入力として, 4次元メッシュモデルを生成する。本手法は主に3つの処理からなっている:

- (1) 3次元モデル内部の四面体分割
 - (2) 3次元モデルの運動による掃引形状の四面体分割
 - (3) (1),(2)の四面体を統合して4次元メッシュモデル出力
- 以下で(1)と(2)の処理について説明する。

3.2 3次元メッシュモデル内部の四面体分割

時刻 $t_0 \leq t \leq t_N$ で運動する3次元メッシュモデルを閉じた4次元メッシュモデルとして表現するには, 4次元メッシュモデルの $t=t_0$ と $t=t_N$ の両端を四面体で表現しなければならない(図2)。本研究では, 制約付き Delaunay 四面体分割を用いることで3次元メッシュモデル内部を四面体分割することを行った。制約付き Delaunay 四面体分割は, 多面体の表面形状を制約として多面体内部に頂点を生成し, 四面体に分割する手法である。実装ではオープンソースのプログラム TetGen[2]を用いた。

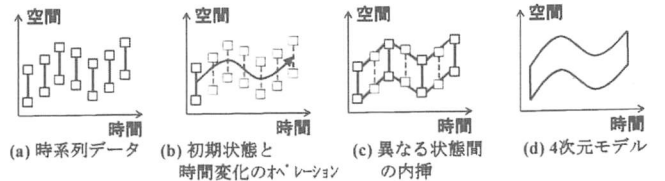


図1 3次元モデルの時間変化の表現方法の違い

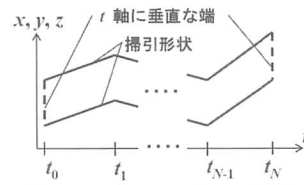


図2 3次元モデルの運動による4次元形状

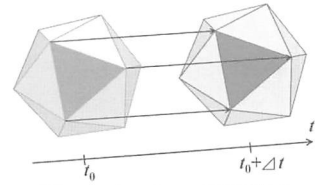


図3 メッシュの運動によってできる掃引形状

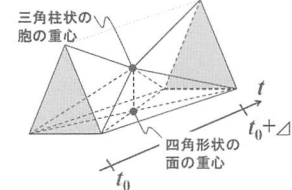


図4 三角柱の四面体分割

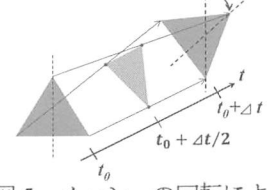


図5 メッシュの回転による時刻間における捻じれ

3.3 3次元メッシュモデルの運動の掃引形状の四面体分割

3次元メッシュモデルを構成する1枚の三角形メッシュに注目する。ある時刻 $t=t_0$ におけるメッシュと, 時間 Δt 経過したときのメッシュの状態間を直線で結んだ4次元形状は三角柱状の胞である(図3)。三角柱の胞を構成する3枚の四角形状の面の各重心位置に頂点を生成し, さらに, 三角柱の胞の重心位置に頂点を1つ生成する。以上の4頂点と, 三角柱の胞を構成する6頂点の合計10頂点から, 三角形状の面を構成要素とする四面体が2つ, 四角形状の面を構成要素とする四面体が1面当たり4つできる(図4)。従って1つの三角柱状の胞は合計14個の四面体に分割される。

3.4 体積変化を指標とした回転刻み角の決定

回転運動に対し本手法を適用すると回転前後, つまり時刻 $t=t_0$ と $t=t_0+\Delta t$ のメッシュ間を直線で結ぶと4次元の“捻じれ”が発生する(図5)。そのため本研究では時刻 $t=t_0+\Delta t/2$ における3次元モデルの体積が与えられた閾値より小さくならないように, 回転を以下に示す回転刻み角 θ ずつの回転に分割する。

4点 $P_i = [x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i}]^T (i=1\sim 4)$ で構成される体積 V_P の四面体を任意点を通る任意方向の軸周りに角度 θ 回転することを考える。任意点を通る任意方向の軸周りに回転する変換行列は, 3次元アフィン変換の合成によって表すことができる。回転後の4点を P'_i とし, P_i と P'_i の間のそれぞれの中点を

Q_i とする。また、 Q_i で構成される四面体の体積を V_Q とする。 P_i 、 Q_i からそれぞれ V_P 、 V_Q を求めた後、 V_Q/V_P を求める。 V_Q/V_P を体積比 R_V と定義すると、 R_V は(1)式で求められる。

$$R_V = \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (1)$$

$|\cos\theta| \leq 1$ より $0 \leq R_V \leq 1$ である。 V_P と V_Q は四面体の体積であるが、(1)式は3次元メッシュモデルについても成り立つ。なぜならば3次元モデル内部は四面体に分割することが可能であるため、3次元モデルの体積を、四面体の体積の和と考えることができるからである。

ユーザにより許容する体積変化の下限値 $R_{V_{\min}}$ (ただし $0 \leq R_{V_{\min}} < 1$) が与えられることにより、(2)式のように回転運動の回転刻み角 θ_{step} ($0^\circ \leq \theta_{\text{step}} \leq 180^\circ$ とする) を求めることができる。(2)式は(1)式を変形することで得られる。

$$\theta_{\text{step}} = \cos^{-1}(2R_{V_{\min}} - 1) \quad (2)$$

3次元メッシュモデルを角度 θ 回転させるとき、 θ_{step} ずつの回転に分割することで、モデルの体積変化を許容範囲内に収めることができる。ただし実装においては角度 θ を等分割するために、 $|\theta/N| \leq |\theta_{\text{step}}|$ となる最小の自然数 N を求め、 θ/N を回転運動の回転刻み角としている。

4 実装結果

4.1 ボクセルモデル時系列データを用いた手法との比較

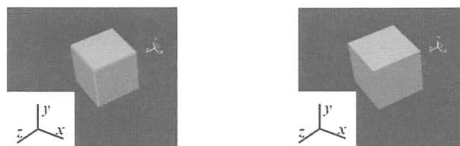
3次元ボクセルモデルの分割数が x, y, z 軸それぞれに対して128、時系列データの数が64のボクセルモデル時系列データと3次元メッシュモデルをそれぞれ入力として4次元メッシュモデルを生成し、比較を行った。コンピュータの環境はCPU:AMD Opteron 2224SE 3.2GHz, RAM:64GBである。ボクセルモデル時系列データは、1辺の長さ20ボクセルの立方体が、時間ステップごとに z 軸方向へ1ボクセルずつ動く。3次元メッシュモデルは、1辺の長さ20で頂点数14、面分数24の立方体形状で、仮想空間における時間 $t = 0-64$ の間に時間間隔1.0ごとに z 軸方向へ+1.0動く。図6に各手法で生成した4次元モデルを $t=32$ に垂直な断面で抽出した描画結果を示す。表1には各手法で生成した4次元モデルの頂点数と四面体数および処理時間を示す。ただし、ボクセルモデル時系列データより生成した4次元モデルは別途頂点マージ処理が必要である。本研究手法を用いることでより高速に、より頂点数と四面体数が少ない4次元モデルを生成できると言える。川岸らはGPUを用いたボクセルモデル時系列データによる4次元モデル生成の高速化[3]を提案しており、本手法でもGPUを用いた高速化を検討する予定である。

4.2 回転運動する3次元メッシュモデルへの適用

図7に示すリスの3次元メッシュモデル(頂点数9,995/面分数20,000)に対し、仮想空間における時間 $t=100.0$ の間に、 x 軸周りに 360° 回転かつ x 軸方向に+20.0平行移動する運動を与えることで4次元メッシュモデルを生成した。許容する体積変化の下限値 $R_{V_{\min}} = 0.9976$ とし、入力した運動は時間軸方向に65等分(5.538°ずつの回転)された。4次元モデル生成の処理時間を図8に示す(4.1節と同環境)。頂点数3,909,554/四面体数18,266,982であった。図9、図10は生成した4次元モデルを x, y, z, t 軸に垂直な超平面で断面抽出した描画結果である。これにより、運動する3次元モデルが4次元のモデルとして表現されていることが確認できた。

5 まとめ

3次元メッシュモデルの掃引形状と3次元メッシュモデル



(a) ボクセルモデル時系列データによる手法 (b) 3次元メッシュモデルによる手法

図6 生成した各4次元モデルの $t=32$ に垂直な断面抽出

表1 各手法で生成した4次元モデルの比較

	ボクセルモデル時系列データによる手法	3次元メッシュモデルによる手法
頂点数	1,582,364	4,750
四面体数	4,740,860	21,552
生成時間[sec]	37.09	0.17

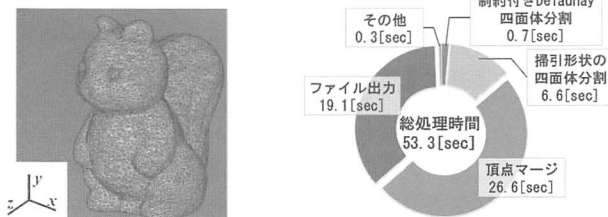
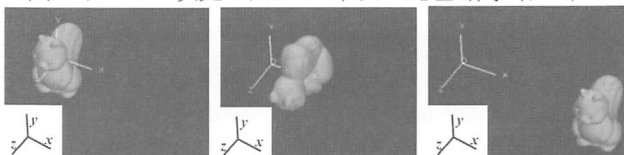
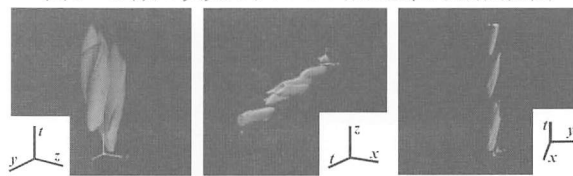


図7 リスの3次元モデル 図8 処理時間(リス)



(a) $t=0$ (b) $t=20.0$ (c) $t=100.0$

図9 生成4次元モデルの t 軸に垂直な断面抽出



(a) $x=3.0$ (b) $y=3.3$ (c) $z=3.9$

図10 生成4次元モデルの x, y, z 軸に垂直な断面抽出

内部の四面体分割を行うことで4次元メッシュモデルを生成することを行った。また、ボクセルモデル時系列データによる4次元モデル生成手法と比較して、より高速に生成可能であることを確認した。そして、生成した4次元モデルを各 x, y, z, t 軸に垂直な超平面で切断した断面形状をグラフィック表示したことで、3次元メッシュモデルとその運動が4次元のモデルとして表現されていることを確認した。

今後の課題として、4次元モデルを出力する際の頂点マージ処理の効率化、GPUによる処理の高速化、4次元四面体メッシュの品質についての評価、3次元デバイス等のインタフェースを用いて運動を入力可能にすることが挙げられる。

参考文献

- [1] 川岸良次他:サイバーフィールドのための4次元形状モデリングに関する研究(第2報), 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, J03, 2008.
- [2] TetGen: <http://tetgen.berlios.de/>
- [3] 川岸良次他:サイバーフィールドのための4次元形状モデリングに関する研究(第3報), 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, O15, 2009.