

ハプティックデバイスを用いたバードカービングシステムの開発

岸田祐樹*

三浦憲二郎†

1 緒言

形状モデリングでは寸法や概形を指定するために、通常キーボードやマウスが用いられ、オペレータにはモデルの視覚情報のみがフィードバックされる。CG や工業製品の意匠デザインに必要とされる高品質な形状を生成するには、デザイナーがイメージする形状を直観的に入力できる方法が望ましく、視覚情報だけでは不十分である。より高品質なモデリングをおこなうためには力覚情報が有効であり、本研究では力覚の提示を伴う形状入力デバイス(ハプティックデバイス)を用いた仮想オブジェクトの加工をおこなうシステムの開発をおこなう。特に本研究では広い年齢層に親しまれ、他の彫刻にも応用できるバードカービングをターゲットとする。

2 バードカービング

バードカービングとは木材を用いた鳥の彫刻のことである。本研究では型で切り抜く「切り抜き」、ある程度形を成型する「荒彫り」、細かい模様をつける「子造り」に必要なツールを作成する。

3 モデル

本研究では形状処理にサーフェル、力覚処理に内部にも情報を有する等間隔点群モデルを用いる。形状処理にサーフェルを用いることにより、要素間の接続情報が不要となり高速に集合演算ができる[1-3]。また、力覚処理では安定した力覚計算をおこなうために等間隔点群モデルを用いる。ワークの初期形状として立方体を用いる。

4 形状処理

形状処理にはサーフェルを用いる。サーフェルとは位置、法線、半径、色の属性を持つ円盤のことである。

4.1 切り抜き処理

切り抜き処理は図1で示すような2値化した $n \times n$ の正方形の画像データを利用しておこなう。任意のサーフェル S の位置を (x, y, z) 、ワークを表すサーフェル(ワークサーフェル)の最大座標値を $(x_{Max}, y_{Max}, z_{Max})$ 、最小座標値を $(x_{Min}, y_{Min}, z_{Min})$ とすると、 S が存在するピクセル n_x, n_y は次式で表せる。

$$\begin{aligned} n_x &= (x - x_{Min}) \frac{n}{x_{Max} - x_{Min}} \\ n_y &= (y - y_{Min}) \frac{n}{y_{Max} - y_{Min}} \end{aligned} \quad (1)$$

求めた n_x, n_y の画像の色情報が黒ならサーフェルを残し、白ならサーフェルを削除する。

*静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻
†静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻

次に、側面のサーフェルを生成する。側面サーフェルは用意した画像の輪郭を用いて生成する。ある輪郭ピクセル p_i に存在するワークサーフェルの z の最大値 z_{max} 、最小値 z_{min} を検出する。 p_i の位置を x_{p_i} 、 p_i の隣接ピクセル p_{i+1} の位置を $x_{p_{i+1}}$ とするとサーフェルは $(x_{p_i} + x_{p_{i+1}})/2$ の位置に z_{min} から z_{max} の範囲に等間隔に生成する。図1を用いて y 軸方向に切り抜いて得られた結果を図2に示す。また、図2を用いて z 軸からさらに切り抜いた結果を図4に示す。



図 1: 使用した画像

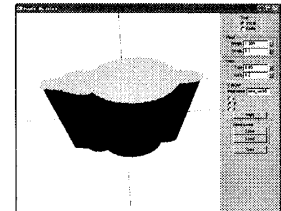


図 2: 1方向切り抜き結果



図 3: 使用した画像

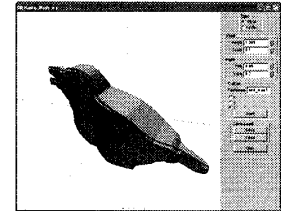


図 4: 2方向切り抜き結果

4.2 荒彫り処理

荒彫り処理にはナイフツールを用いる。長方形を生成し、この長方形の現在のフレームと1フレーム前からできる直方体とワークの内外判定をおこなうことにより荒彫り処理をおこなう。

4.2.1 ツールに対するワークの内外判定

生成された直方体の1つの面の方程式を $f(x)$ 、任意のワークサーフェル S_w の位置を x_w とすると、次式で各面を判定することにより S_w は内外判定される。 d_s はBOUNDを判定するための正の微小量である。

$$\begin{aligned} d_s < f(x_w) & \quad \text{OUTSIDE} \\ 0 < f(x_w) < d_s & \quad \text{BOUND} \\ f(x_w) < 0 & \quad \text{INSIDE} \end{aligned} \quad (2)$$

4.2.2 ワークに対するツールの内外判定

生成した直方体面上にサーフェルを生成し、ワークに対してこれらのサーフェルを内外判定する。式(2)によりBOUNDと判定されたサーフェル S_b の位置を x_{b_i} ($i = 1 \dots n$)(n は S_b の数)、法線を n_{b_i} 、ツールの任意のサーフェル S_t の位置を x_t とすると、次式を $0 \sim n$ まですべて満たしたとき S_t はINSIDEと判定される。

$$\mathbf{n}_{b_i} \cdot (\mathbf{x}_{b_i} - \mathbf{x}_t) > 0 \quad (3)$$

また、 S_t のエッジまでの距離 d_t は次式の最小値で求まる。

$$d_t = |\mathbf{x}_{b_i} - \mathbf{n}_{b_i}| \quad (4)$$

求めた d_t を用いて、式 (3) で判定したサーフェルを次式でさらに細かく判定する。

$$0 < d_t < d_s \quad \text{BOUND} \quad (5)$$

$$d_s < d_t \quad \text{INSIDE}$$

ナイフツールにより立方体モデルの角を荒彫りした結果を図5に示す。

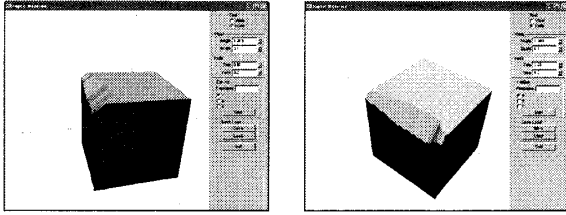


図5: 荒彫り結果

4.3 子造り

子造りは三角刀で行い、処理に関してはナイフと同様の処理をおこなう。ナイフでは現在のフレームと1フレーム前の長方形からできる直方体で処理するが、三角刀ではフレームと1フレーム前の二等辺三角形からできる三角柱で処理する。また、子造りでは羽の模様など細かい線を入れるため、エッジを精細にするリサンプリング処理もおこなう。本研究ではポリゴンをエッジに並べるによりリサンプリングをおこなう(図6)。

4.3.1 リサンプリング処理

リサンプリング処理は式(2)でBOUNDと判定されたサーフェルに対しておこなう。まず、三角柱のある面 $f = \mathbf{N} \cdot \mathbf{x} + d$ にBOUNDと判定されたサーフェル S_b を投影する。 S_b の位置を \mathbf{x}_{b_i} 、法線を \mathbf{n}_{b_i} とすると投影後の座標 \mathbf{x}_{edge_i} は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i &= \mathbf{N} - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{n}_{b_i}) \mathbf{n}_{b_i} \\ \mathbf{x}_{edge_i} &= \mathbf{x}_{b_i} - \frac{d + \mathbf{N} \cdot \mathbf{x}_{b_i}}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{v}} \end{aligned} \quad (6)$$

求めた \mathbf{x}_{edge_i} を用いてポリゴンの各点の座標(図6)は次式で求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P1} &= \frac{\mathbf{x}_{edge_{i-1}} + \mathbf{x}_{edge_i}}{2} \\ \mathbf{P2} &= \frac{\mathbf{x}_{edge_i} + \mathbf{x}_{edge_{i+1}}}{2} \\ \mathbf{P3} &= \frac{\mathbf{P1} + \mathbf{P2}}{2} + w\mathbf{v} \\ \mathbf{P4} &= \frac{\mathbf{P1} + \mathbf{P2}}{2} + w(\mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 w はポリゴンの高さを示している。立方体表面を三角刀で削った結果を図7に示す。赤色の部分はリサンプリング処理した部分を示している。

5 力覚処理

力覚処理は等間隔点群モデルを用いておこなう。各点は属性として位置、法線、内外判定フラグの情報を持っている。

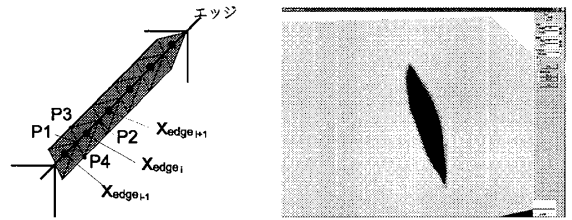


図6: リサンプリング 図7: 三角刀での切削結果

5.1 力覚計算

切削力 \mathbf{F} は節4.2, 4.3で作成した直方体または三角柱によって削除された点群の数 n とその平均法線 \mathbf{n}_{avg} から計算する。

$$\mathbf{F} = n\mathbf{n}_{avg} \quad (8)$$

削除の判定は式(2)と同様におこない、INSIDEと判定されたサーフェルを削除し切削力の計算をおこなう。

5.2 力覚モデルの更新

削除をおこなった際、力覚を計算するために表面の法線情報を更新する必要がある。削除された点と隣接している6方向の点を見て、1つでもOUTSIDEのフラグが立っているならこの点は表面の点である。直方体または三角柱のある面 $f = \mathbf{N} \cdot \mathbf{x} + d$ に対して表面の点の内外判定フラグがBOUNDならその点の法線を \mathbf{N} とする。

6 結果

図4の胴体部分に対して荒彫り処理をおこなった結果を図8に示す。また、図8の胴体部分に三角刀により羽の模様の線を1本入れた結果を図9に示す。

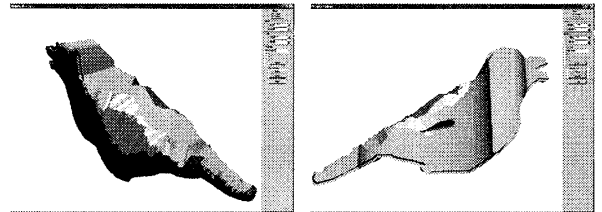


図8: 荒彫り結果

図9: 子造り結果

7 考察

バードカービングをコンピュータ上でおこなうため、切り抜き、ナイフ、三角刀の3つのツールを作成した。しかしながら、3次元のものを2次元で見ているため操作感に違和感を覚えることや、ナイフや三角刀によって削られた面が滑らかでないといった問題が生じた。今後の課題としては立体視やヤスリツールの作成、ナイフや三角刀の改良などが考えられる。

参考文献

- [1] Bart Adams, Philip Dutre, "Interactive Boolean Operations on Surfel-Bounded Solids", Siggraph 2003, pp.651-656.
- [2] 中村康志, "ポイントベースモデリングと陰関数曲面との集合演算とその高品質レンダリング", 静岡大学工学部 2005 年度卒業論文.
- [3] 岸田祐樹, "ハプティックデバイスを用いた切削によるポイントベースモデリング", 静岡大学工学部 2006 年度卒業論文.