

2012年度 卒業論文

細分割曲面を用いた樹木に対する
雨氷の形状のモデリング

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト

学籍番号 M0109082

大矢 梓

2012年度 卒業論文概要

論文題目

細分割曲面を用いた樹木に対する
雨氷の形状のモデリング

メディア学部

学籍番号：M0109082

氏名

大矢 梓

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

着氷現象、雨氷、3DCG、
モデリング、過冷却、サブディビジョンサーフィス

近年、多くの分野で様々な自然現象などのコンピュータグラフィクスによる表現が行われている。自然現象の表現は映画やゲームなどで季節感や温度などの体感的な情報を表現する際に利用する。本研究では、氷の形状について着目し、特殊な形状を作る着氷現象の中の雨氷について着目した。本研究ではモデリングソフトなどによる雨氷の表現をする際の手間の削減を目的とし、雨氷の形状についてのプログラムによるモデリングを行った。本手法では、木の枝を想定したモデルの周りに同じ形状を法線方向に拡大した氷を想定したモデルを配置し、氷のモデルの形状を変化させることで、雨氷の形状の再現を行った。実際の形状へ近づけるために、枝のモデルの側面を分割することで曲面化の際に生成される頂点を制御し、そのモデルにサブディビジョンサーフィスによる曲面化を適用することで雨氷の特徴の表現を試みた。雨氷の形状についてのモデリングの結果の検証を行い、本手法の有用性を確認した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	雨水について	2
1.3	本論文の構成	5
第2章	提案手法	6
2.1	サブディビジョンサーフェスについて	6
2.2	雨水の形状生成	16
第3章	結果	17
3.1	実行結果	17
3.2	評価	24
第4章	まとめと今後の課題	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

1.1	着氷の分類	2
1.2	逆転層の図	3
1.3	樹氷	4
1.4	雨水が花に着氷した図	5
1.5	雨水が小型のりんごに着氷した図	5
2.1	分割前	7
2.2	1回分割	8
2.3	2回分割	9
2.4	面点の生成	10
2.5	線点の生成	11
2.6	新たな頂点の生成	12
2.7	曲面化モデルの生成	13
2.8	枝に付着した雨水	14
2.9	直方体 (曲面化前)	15
2.10	直方体 (曲面化後)	15
2.11	分割した直方体 (曲面化前)	15
2.12	分割した直方体 (曲面化後)	15
3.1	実行結果 1	18
3.2	木の制御ポリゴンの状態	19
3.3	側面を分割していない場合	20
3.4	実行結果 2	21
3.5	実行結果 3	22
3.6	実行結果 4	23

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、多くの分野で自然現象などのコンピュータグラフィクスによる表現が行われている。自然現象の表現は映画やゲームなどで季節感や温度などの体感的な情報を表現する際に有用である。その中でも雪や氷などは寒さについて表現する際に重要な役割を果たすため、それらについての研究は盛んに行われている [1][2][3][4]。氷の研究では、形状、光の反射や屈折、氷解などについての研究が行われている [5][6]。本研究では氷にまつわる自然現象である雨氷に着目した。雨氷の表現を行う場合に、モデリングソフトなどを用いた手作業によるモデリングでは大変な手間がかかる。この問題を解決するためには、複雑な計算や手間をかけずに視覚的に実際のものに近い結果が得られることが望ましい。そこで本研究では、雨氷の見た目について着目し、特殊な形状を作る雨氷についてモデリングを行う。雨氷は着氷現象の一種である。着氷現象とは、過冷却水滴が、樹木などの物体に衝突することで衝突した面から凍結し、氷層を形成する現象である。図 1.1 は着氷現象を分類したものである。着氷現象は大きく霧氷と雨氷に分類され、霧氷の中で形態により樹氷、粗氷、樹霜に分かれる。なお、着氷現象の分類については「着氷の物理的研究」 [7] [8] [9] [10] [11] を参考にした。

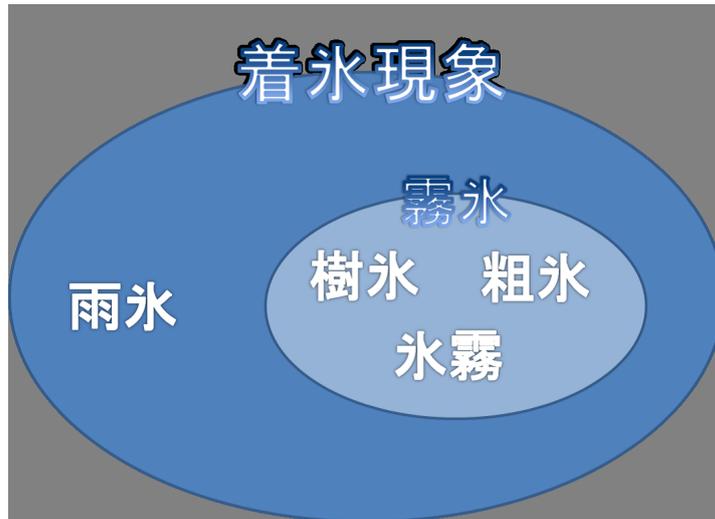


図 1.1: 着氷の分類

1.2 雨氷について

雨氷は過冷却水滴が雨として降り注ぐことで氷層が形成される現象である。過冷却水とは、水の融点である0度以下に冷却された場合でも氷にならずに液体の状態を保持している水である。過冷却状態の水に振動などの刺激を与えると急速に凍結し、氷になる [12]。雨氷の発生する気象条件として、図 1.2 のように上空に雪を雨滴にする気温0度以上の暖気の層 (以下、融解層)、融解層の上に雪を作る冷却層、融解層の下に雨滴を冷却する気温0度以下の冷気の層 (以下、再冷却層) からなる逆転層というものが必要である [13]。融解層により雪から雨へと変化した雨滴が再冷却層により過冷却水滴へと変換し雨として降り注ぐ。

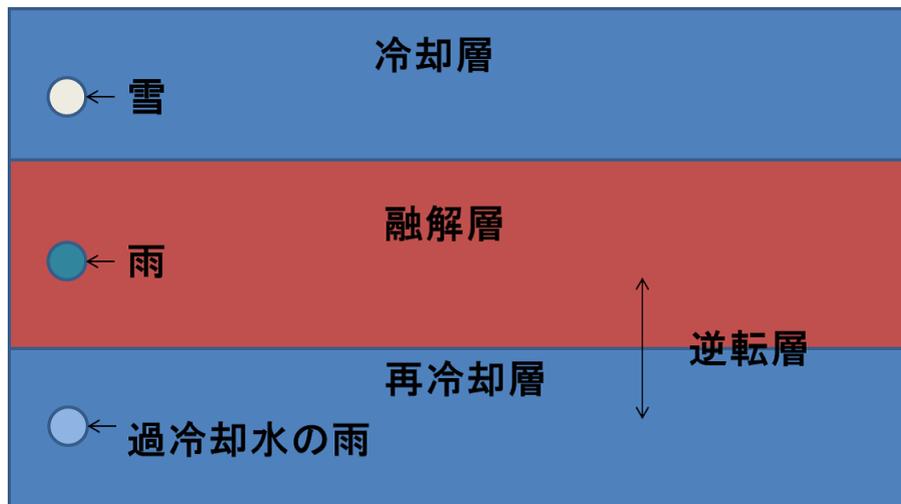


図 1.2: 逆転層の図

雨水の特徴として、過冷却水滴が雨として降るため、衝突した物体を覆うようにして氷層を形成するものが見られる。雨水に類似した現象である樹氷や粗氷は空気中の水分が周りの気温により過冷却水滴状態になった着氷性の霧が風により樹木などに衝突し、付着したものである。そのため樹氷や粗氷は風上方向へと成長していくのが特徴である。樹氷を形成する過冷却水滴は密度が小さく、気温が主に -6 度以下の時に形成されるため物体へ衝突後瞬時に凍結する。樹氷の構造は小さな団子状の氷が重なったような隙間の多いものになり色は全体的に白く、羽毛状に成長していく。粗氷を形成する過冷却水滴は樹氷を形成するものよりも密度が大きく、樹氷に比べて完全に凍結するまでの時間が多少長い丸みを帯びた、表面が滑らかなものが形成される。また、樹氷は全体的に色が白いが、粗氷は気泡を含まない透明な氷の層と気泡を含んだ氷の層により形成されるため、樹氷に比べて透明度が高く、半透明の状態であることが多い。次の図 1.3 は樹氷の写真である。



図 1.3: 樹氷

一方、雨氷は過冷却水が雨として降るため粒の密度が大きく、気温が0度に近い場合に起こるため、水滴の熱の奪われる速度が遅く完全に凍結するまでに時間がかかる。衝突した過冷却水滴が凍結しきらないうちに次の過冷却水滴が衝突し凍結が始まるため、凍りきらない水滴は表面を凍りながら流れて行き、衝突物に対してそれを覆うようにして氷が形成されてゆくものも多く見られる。そのため、中に気泡が入ることが少なく、透明なものが多い[14]。凍結に時間が掛かり風向きや重力により過冷却水滴が流されていくため、凍結する過程でつららのような形状が出来上がる場合もある。図 1.4、図 1.5 に実際の雨氷の写真を示す。図 1.4 では花に衝突し、花卉を覆うように付着していることがわかる。図 1.5 では小型のりんごの表面が水滴で覆われている。



図 1.4: 雨水が花に着氷した図



図 1.5: 雨水が小型のりんごに着氷した図

1.3 本論文の構成

本論文は全4章で構成する。2章で提案手法について、3章では実装結果を示した上で、手法についての評価を行う。最後に4章でまとめと今後の課題についてを述べる。

第 2 章

提案手法

本研究では、木の枝に雨水が付着したという想定のもと、雨水の形状を再現するため 3D モデルの形状を変形させ雨水の形状生成を行う。

2.1 サブディビジョンサーフェスについて

本研究では形状の変化の際にサブディビジョンサーフェスを使う。サブディビジョンサーフェスは、多面体形状に対して分割と重み付けを繰り返し適用することで、大まかにモデリングしたポリゴンメッシュを細分化し、少ないポリゴンの入力から滑らかで継ぎ目のない形状にする技術である。3DCG における曲面表現の手法として有名なものにポリゴンメッシュとパラメトリック曲面がある。ポリゴンメッシュとは、平面状の多角形を貼り合わせたもので、なめらかではないが任意の形状を容易に近似することができる。パラメトリック曲面は 2 つのパラメータの関数でもって曲面を表現する方法で、少数の制御点によって広域的で滑らかな形状を表現する手法である [15]。本研究ではポリゴンメッシュを用いて形状の曲面化表現を行う。なお、モデルの表示には OpenGL をベースとした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System [16] を、曲面化処理においては Catmull と Clark 等が提唱したサブディビジョンサーフェス [17] を使用する。Catmull-Clark の細分割曲面は、任意位相の初期ポリゴンメッシュに細分割処理を繰り返し適用するこ

とで、滑らかな曲面を生成する手法である [18]。本研究では曲面化処理適用前の形状を制御ポリゴン、適用後の形状を曲面化モデルと呼ぶこととする。図 2.2, 図 2.3 は制御ポリゴン図 2.1 に Catmull-Clark の細分割処理を 1 回適用したものと、2 回適用したものである。

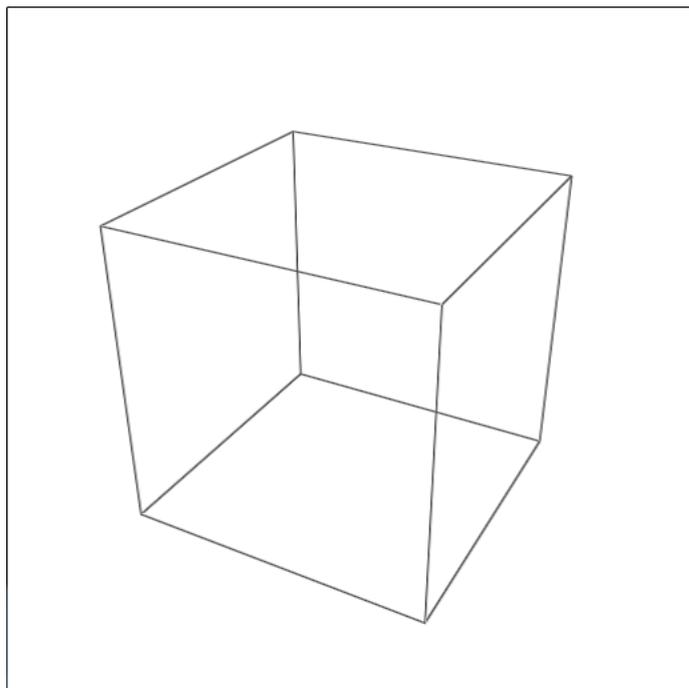


図 2.1: 分割前

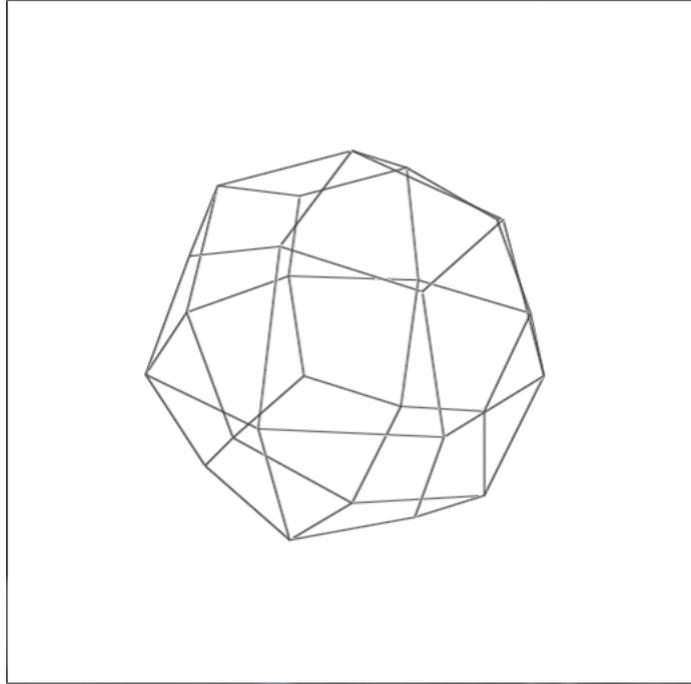


図 2.2: 1 回分割

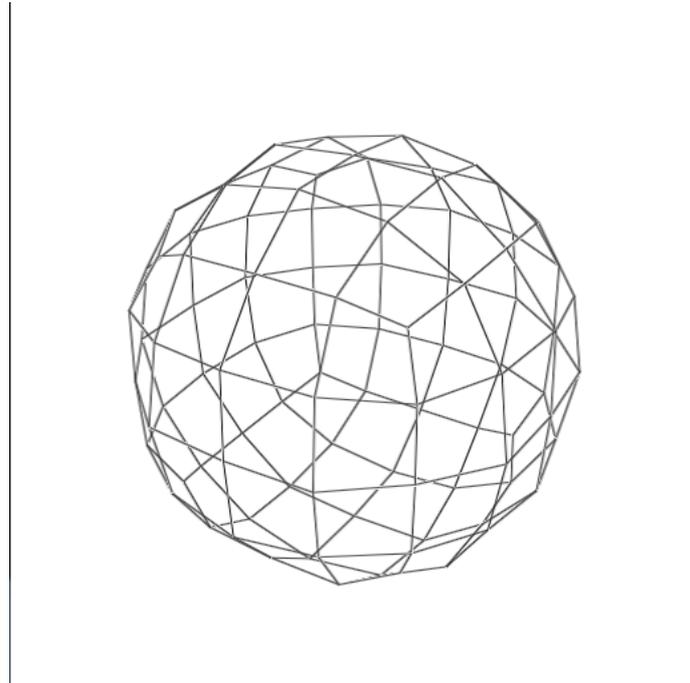


図 2.3: 2 回分割

曲面化処理の手順としては次のようになっている。

1. 面点の生成
2. 線点の生成
3. 新しい頂点の生成

面点は、各面に対してその面の重心を座標とする位置に生成される新しい点である。図 2.4 における青い点が手前に来ている 3 つの面の面点である。

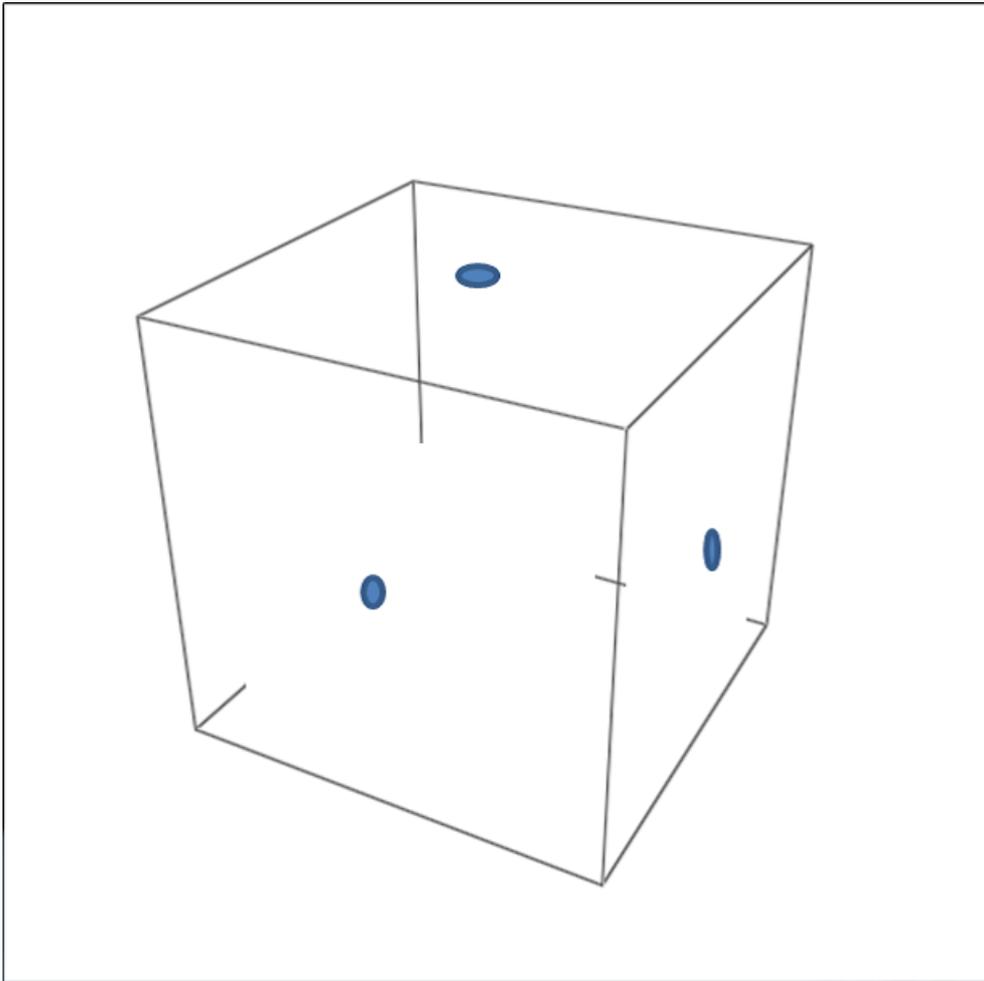


図 2.4: 面点の生成

線点は、ある辺に対してその辺の両側にある面点とその辺の両端の頂点との平均の座標の位置に生成される新しい点である。図 2.5 において赤色の線が対象になっている辺。青い点線でつながれている赤い点 2 つが対象の辺の両側の面点。青い四角形が生成される線点の位置である。

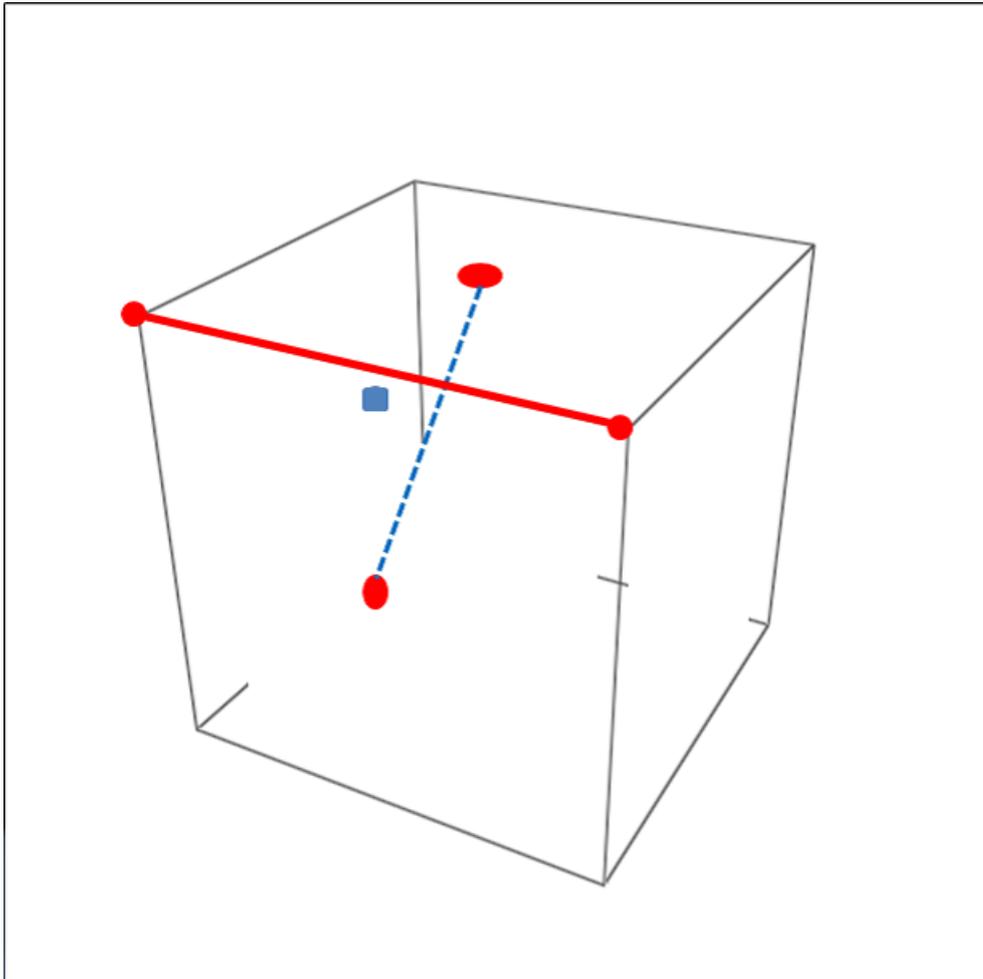


図 2.5: 線点の生成

新たな頂点は制御ポリゴンの頂点の曲面化処理後の座標である。対象となる頂点と算出された面点と線点から次の式 (2.1) により新たな頂点の座標 P を決定する。

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{Q} + 2\mathbf{R} + \mathbf{S}(n - 3)}{n} \quad (2.1)$$

\mathbf{Q} は対象の頂点に隣接する全ての新しい面点の平均、 \mathbf{R} は対象の頂点を端点とした辺の中点の平均、 \mathbf{S} は対象の頂点の座標、 n は面の面数である。次の図 2.6 における面上にある青い点が頂点に隣接する面の面点、边上にある赤い点が頂点を端点とした辺の中点、緑色の三角形が対象としている頂点である。

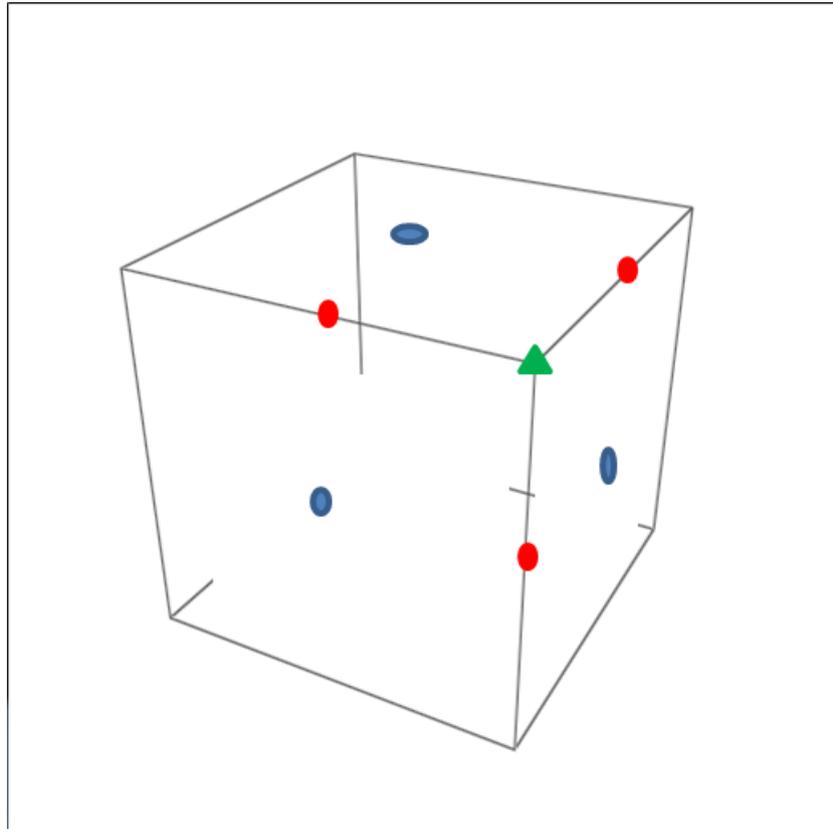


図 2.6: 新たな頂点の生成

面点、線点、新たな頂点を結ぶことにより曲面化モデルが生成される。次の図 2.7 が今までの手順により曲面化処理を 1 回適応した場合のもので、点線により表されている立方体が制御ポリゴン、実線の多面体が曲面化モデル、丸が面点、四角形が線点、三角系が制御ポリゴンの対象の頂点、星印が式 (2.1) により新たに生成した頂点である。

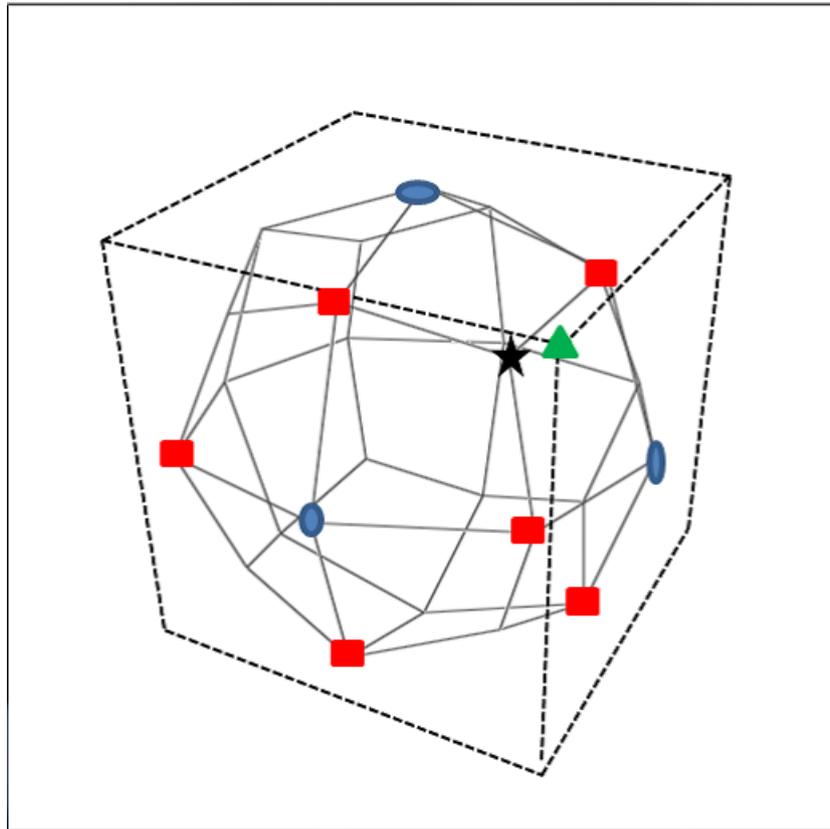


図 2.7: 曲面化モデルの生成

本研究で今回目指す形状として図 2.8 の枝に付着した雨水の形状の特徴である

- 枝の周りをおおよそ均一な厚さで覆っている
- 枝の先端部を覆う部分は丸みを帯びている

という 2 つを設定する。



図 2.8: 枝に付着した雨水

氷の制御ポリゴンを曲面化する際、図 2.9 のような直方体をそのまま曲面化すると図 2.10 のように中央部分が分厚く先端にいくほど細くなってしまふ。このままだと枝を均一の厚さで覆う形状とは異なってしまふ。

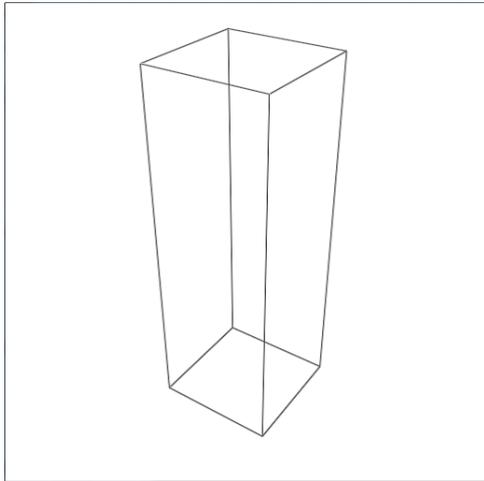


図 2.9: 直方体 (曲面化前)

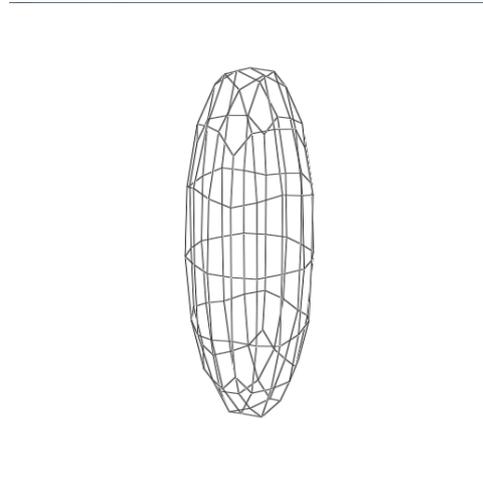


図 2.10: 直方体 (曲面化後)

そこで、それを解決するために次の図 2.11 のように枝の側面部分の面を分割することにより、新たに生成された面点と線点が側面上に並ぶことにより曲面化された際に丸みを帯びる開始地点を先端部に近づけることで図 2.12 のように厚さを均一に近づける。

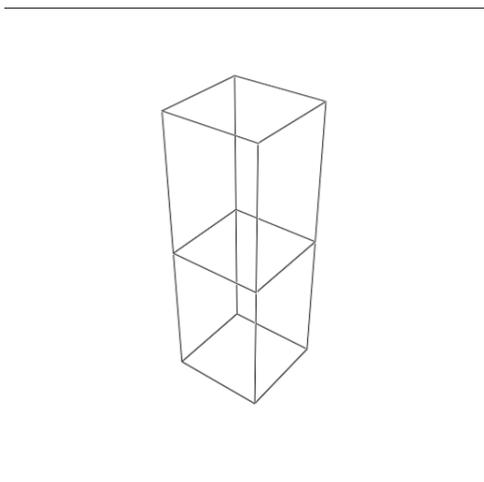


図 2.11: 分割した直方体 (曲面化前)

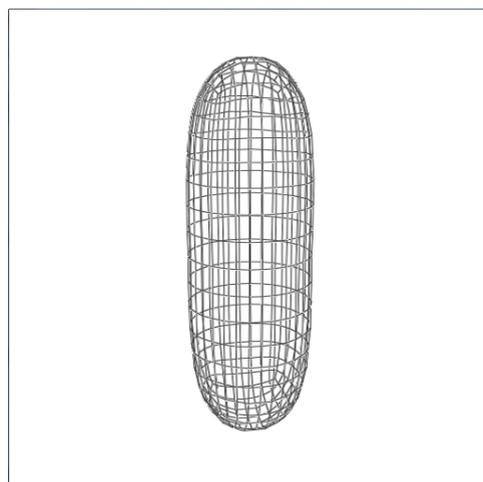


図 2.12: 分割した直方体 (曲面化後)

2.2 雨氷の形状生成

本研究では、木の枝を想定した制御ポリゴンから、その周りにそれを法線方向に拡大した氷を想定した制御ポリゴンを配置する。その後、氷のモデルに曲面化処理をほどこすことで、雨氷の形状を表現する。雨氷の形状を表現する際にユーザーが任意の枝形状に対して雨氷を生成できるようにするため、雨氷が付着する木の枝の制御ポリゴン、曲面化処理の適用回数、法線ベクトルの拡大倍率をユーザーによる入力値とする。各頂点の法線ベクトルを入力された分だけ拡大し、その長さ分法線方向に頂点を元の座標から移動することで氷の制御ポリゴンを拡大する。前提条件として、ユーザーの入力する木の枝を想定した制御ポリゴンは四角形のポリゴンを組み合わせた形状により表現するものとする。

第 3 章

結果

本章では、2章で述べたモデリングの手法の実行結果を示し、実際の雨水との形状の類似性を検証する。

3.1 実行結果

図 3.1 に示すものが、本研究の手法を用いて生成したものである。。黒色のモデルが木の枝を想定したもの、それを覆っている半透明のモデルが氷を想定したモデルである。この時のユーザによる入力は、曲面化処理適用回数が 3 回、拡大倍率が 10 である。



図 3.1: 実行結果 1

この実行結果から設定した2つの表現目標であるおおよそ均一な厚さで覆うというものと、先端部は丸みを帯びた形状の表現ができていることが確認できる。次の図 3.2 に示すのは、図 3.1 の木の制御ポリゴンの状態である。2章で示したとおり、分かれて伸びているそれぞれの直方体の側面を分割した状態のものを使用している。それにより目標の形に近づくようにしている。

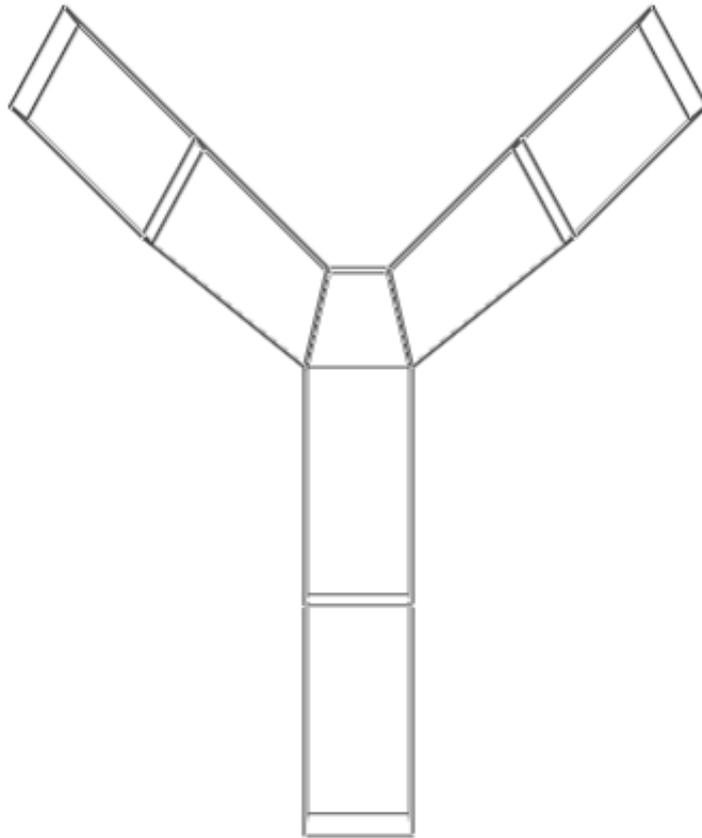


図 3.2: 木の制御ポリゴンの状態

次の図 3.3 に示すものは、側面を分割していない制御ポリゴンを曲面化した場合のものである。

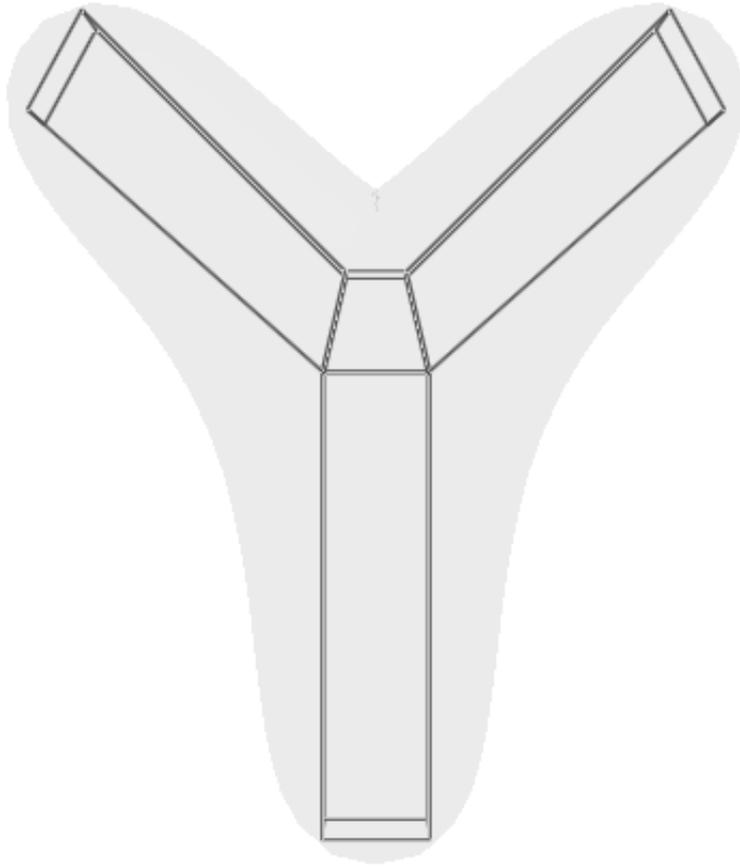


図 3.3: 側面を分割していない場合

このように、側面を分割していないものを曲面化した場合は 2 章で示したもののよう先端がすぼまっている状態ではないが、面点や線点の生成される位置の関係で目標にしている形状とは異なったものになってしまうため、側面を分割しておく必要がある。次に図 3.4 に示すのは、木の制御ポリゴンを変形させた場合のものである。この時のユーザによる入力も曲面化処理適用回数 3 回、拡大倍率 10 である。



図 3.4: 実行結果 2

この結果から本手法で雨氷の表現を行う際にある程度は任意の形状に対して有効であることが確認できる。次に図 3.5 に示すものは、枝の制御ポリゴンの形状が急激に変化しているものである。この時のユーザによる入力は曲面化処理適用回数 3 回、拡大倍率 10 である。



図 3.5: 実行結果 3

枝形状の変化が急激である場合図 3.5 のように変化が急な部分は氷の曲面化モデルから枝の制御モデルが飛び出してしまうことがある。この問題については拡大倍率を大きくすることで対処が可能である。次の図 3.6 に示すものが、拡大倍率を大きくしたものである。この時のユーザによる入力は曲面化処理適用 3 回、拡大倍率 15 である。

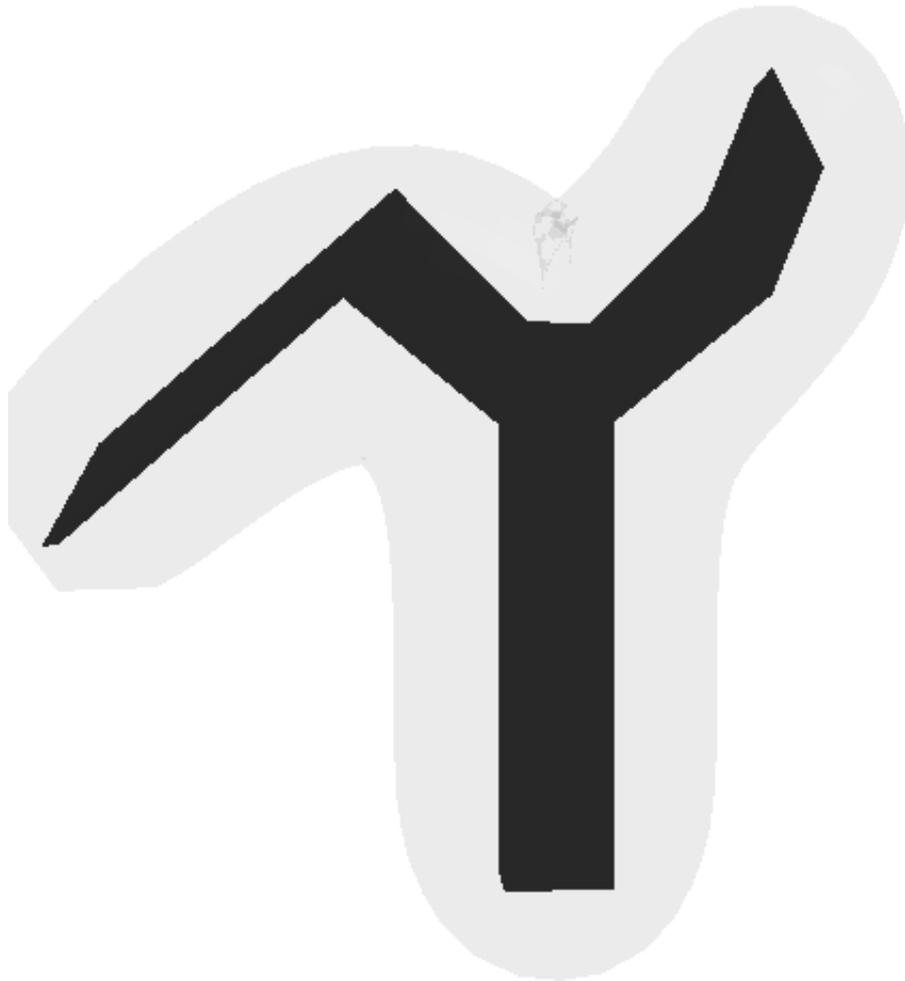


図 3.6: 実行結果 4

図 3.6 の状態では、図 3.5 と比べて全体的に厚くなり、急激な変化をしている部分の覆われ方が他よりも薄くなってしまい均一な厚さではないが枝の制御ポリゴンの飛び出しは解消している。

3.2 評価

上記の実行結果から、枝の制御ポリゴンと同じ形状を法線方向に拡大した氷の制御ポリゴンに対し曲面化処理を行うことにより、目標としていたおおよそ均一の厚さで覆うという部分と先端部は丸みを帯びているという特徴の再現に成功した。形状の異なる場合であってもそれに対し特徴を再現することができたため、任意の形状に対しても対応できることを確認した。枝の制御ポリゴンの形状が急激に変化している場合の枝の制御ポリゴンが氷の制御ポリゴンから飛び出してしまう問題は拡大倍率の操作に対象部分の厚みが均一ではなくなってしまうが対応できることを確認した。以上のことから、本研究の手法が有用であることが確認できる。

第 4 章

まとめと今後の課題

本研究では、雨水の特徴である枝を均一な厚みで丸みを帯びた状態で覆うという状態の表現を試みた。枝の制御ポリゴンと同形状の制御ポリゴンを法線方向に拡大した氷の制御ポリゴンで覆い、そのモデルにサブディビジョンサーフィスによる曲面化を適応することにより形状生成を行った。それにより目標としていた枝の制御ポリゴンをおおよそ均一な厚さで覆うという特徴と先端部は丸みを帯びているという特徴の表現に成功した。また、任意の形状に対しても本手法が有効であったため、目的である雨水の表現をする際の手間の削減に成功したと考えられる。今後の展望として、現状では枝形状に急激な変化があった場合に倍率操作だけでは不十分である。側面の分割も現在は自動では行うことができないためこれらの改善が必要である。また、今回大まかな形状については再現できたが、本来表面にある微細な凹凸は再現できていない。それを表現することで実際の雨水にさらに近づくことができると考える。

謝辞

心が折れた時にも優しく道を示してくれた三上先生と渡辺先生に深く感謝いたします。プログラムでも論文のチェックでも頼ってしまい、夜遅くにメールするなど失礼なことをいろいろとしてしまったにも関わらず最後まで助けていただいた竹内先生に深く感謝いたします。手法が変更されるまでの間ご指導いただきました石川先生に感謝します。研究に必要不可欠なプログラムを提供してくださった武田先輩に感謝します。様々なアドバイスをしてくださった院生の先輩方に感謝します。また、落ち込んでいる時に励ましてくれたり苦楽を共にしたゲームサイエンスプロジェクトのメンバーに感謝します。未だ見たことのない研究テーマである雨水の存在に感謝します。

参考文献

- [1] 後藤智英, 小杉信, 向井信彦. 降雪のリアルタイムシミュレーション (映像表現 & コンピュータグラフィックス). 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 32, No. 34, pp. 13–16, 2008.
- [2] M. Fujisawa and K.T. Miura. Animation of ice melting phenomenon based on thermodynamics with thermal radiation. In *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*, pp. 249–256. ACM, 2007.
- [3] 森木大樹, 床井浩平. 雪の不規則な動きを考慮した積雪のリアルタイムシミュレーション. 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, Vol. 2002, No. 77, pp. 109–114, 2002.
- [4] 床井浩平, 森木大樹. 積雪形状のリアルタイムモデリング (コンピュータグラフィックス). 情報処理学会論文誌, Vol. 47, No. 5, pp. 1558–1565, 2006.
- [5] 青木悦子, 藤代一成. モルフォロジーに基づく氷解現象のモデリング. 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, Vol. 99, No. 70, pp. 85–90, 1999.
- [6] T. Kim, D. Adalsteinsson, and M.C. Lin. Modeling ice dynamics as a thin-film stefan problem. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics*

- symposium on Computer animation*, pp. 167–176. Eurographics Association, 2006.
- [7] 小口八郎. 着氷の物理的研究 I.: 顕微鏡的構造による着氷の分類. 低温科学, Vol. 6, pp. 95–101, 1951.
- [8] 小口八郎. 着氷の物理的研究 II.: 着氷の気象条件に就いて. 低温科学, Vol. 6, pp. 103–115, 1951.
- [9] 小口八郎. 着氷の物理的研究 III.: 着氷の密度に就いて. 低温科学, Vol. 6, pp. 117–123, 1951.
- [10] 小口八郎. 着氷の物理的研究 IV.: 着氷の寸法効果. 低温科学, Vol. 6, pp. 125–130, 1951.
- [11] 小口八郎. 着氷の物理的研究 V.: 着氷の顕微鏡的構造と凍結の機巧. 低温科学, Vol. 6, pp. 131–146, 1951.
- [12] 芳治鈴木. 水のポリアモルフィズム: 実験によるその正当性の検証 (交流). 日本物理学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 318–324, may 2006.
- [13] 松下拓樹, 尾関俊浩, 西尾文彦. 2004 年 2 月に北海道・岩見沢付近で発生した雨水現象の特徴. 天気, Vol. 52, No. 9, pp. 675–680, 2005.
- [14] 勝俊矢野. 蔵王のアイスモンスター (樹氷) と積雪. 雪氷防災研究発表会講演予稿集, Vol. 9, pp. 13–23, dec 1993.
- [15] 武田巧視. Gregory 曲面を用いた滑らかさを保持した形状変形の GPGPU による高速化手法. 東京工科大学学士論文, 2008.
- [16] 渡辺大地. FineKernelToolkitSystem. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [17] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-aided design*, Vol. 10, No. 6, pp. 350–355, 1978.

- [18] 三浦憲二郎. 3次元形状表現の基礎—細分割曲面による形状表現—. 設計工学=
JOURNAL OF JAPAN SOCIETY FOR DESIGN ENGINEERING, Vol. 39,
No. 12, pp. 633–641, 2004.