

積雪形状のリアルタイムモデリング

床井浩平[†] 森木大樹[‡]

コンピュータグラフィックスにおいて自然現象や自然物体を表現することは、シーンの現実感を向上させるのに有効な手段である。なかでも積雪の表現は、季節感を表すのに重要な役割を果たす。しかし、任意のシーンを覆う雪の形状（積雪形状）の人手によるモデリングは非常に手間のかかる作業となる。このためシミュレーションなどによって、自動的に積雪形状を求められることが望ましい。本論文では、降雪を妨げる遮蔽物の有無や降下する雪の不規則な動き、および積雪後の雪の移動を考慮した、積雪形状の高速なモデリング手法を提案する。この手法は遮蔽物の検出と雪の不規則な動きの影響の算出にシャドウマップ法を用い、着地した雪を安定な位置へ移動させることによって最終的な積雪形状を決定する。本手法は降雪により刻々と変化する積雪形状を、リアルタイムに再現可能である。

Real-Time Modeling of Snow-covered Shape

KOHE TOKOI[†] and HIRONORI MORIKI[‡]

It is effective for improving the reality of computer graphics to display a natural phenomenon and a natural object. Especially, display of snow coverage plays a role important for expressing a sense of the season. However, since a geometric modeling of the shape of snow which covers arbitrary scenes by hand is the work which requires time and effort, it is desirable that snow covered shape can be automatically obtained by the simulation. This paper proposes the high-speed modeling method of snow covered shape. This method takes the following condition into consideration: a blocking of snowfall by another object, an influence of an irregular motion of falling snow, and a movement after landing of snow. This method applies the shadow buffer method to detect an obstacle, and calculate the influence of an irregular motion of snow, then determine final snow coverage shape by moving the snow to a stable position. This technique can reproduce the snow coverage shape which changes with snowfall every moment on real time.

1. はじめに

近年、映画やゲームなどの分野で、火や水、雲、煙、あるいは風などの自然現象や自然物体の、コンピュータグラフィックスによる表現に関心が集まっている。これらは一般に人手によりリアルにモデリングすることが困難なため、シミュレーションなどにより現象を再現して、目的の形状を得るなどの手段がとられることが多い。しかし、精密な物理シミュレーションにより現象を再現することは、しばしば多くの計算時間や記憶空間を必要とする。そこで現象を効率良く再現するために、さまざまな近似手法や簡略化手法が提案されている。

このような自然現象のうち、火や風、あるいは雪な

どは、仮想空間内で暑さや寒さなどの体感的な情報を再現する際に重要な役割を果たす。このうち積雪の表現は、季節感を表すのに非常に有効な手段となる。しかし、任意のシーンを覆う雪の形状（積雪形状）を人手によりモデリングすることは、不可能ではないにしろ非常に手間のかかる作業となる。このため、積雪形状はシミュレーションなどによって自動的に得られることが望ましい。

積雪形状の決定には、降雪を妨げる遮蔽物の有無や降下する雪の不規則な動き、風向き、積雪後の雪の移動、温度変化による融雪、雪崩、雪の圧縮、雪の種類による粘性の違いなど、多くの要因が関与する。しかし、これらすべての要因をもとに物理的なシミュレーションを実施することは、ゲームなどのインタラクティブな応用には適さない。したがって、これらの要因の中から要求される品質の積雪形状を得るのに必要なものを選ぶなど、何らかの簡略化や近似が必要になる。

従来の積雪景観シミュレーションに関する研究には、

[†] 和歌山大学

Wakayama University

現在、株式会社島精機製作所

Presently with Shima Seiki Mfg., Ltd.

熱伝搬シミュレーションにより融雪形状を自動生成する研究¹⁾、柔軟物体の変形に関する研究^{2),3)}、メタボールを用いた積雪形状のレンダリング方法に関する研究⁴⁾などがある。また積雪形状の決定に関連した研究には、実際に雪を模したパーティクルを落下させて積雪形状を決定する手法⁵⁾や、物体表面からパーティクルを打ち上げたときの遮蔽物との衝突の有無を判定することによって積雪形状を決定する手法⁶⁾⁻⁸⁾がある。

メタボールを用いた手法⁴⁾ではメタボール自体の性質を応用して冠雪を表現することが可能だが、生成される積雪形状はメタボール特有のなだらかな曲面状であり、落雪部分や雪庇のような複雑な形状を再現することは難しい。また、雪をモデル化したパーティクルを落下させて積雪形状を求める手法⁵⁾は、品質を向上させようとするすれば膨大な数のパーティクルが必要になり、消費するメモリ空間や計算コストの増大を招く。Fearingの方法⁶⁾は非常に高い品質を得ているが、これも物体表面からパーティクルを打ち上げて遮蔽物の有無を判定するという、非常に計算コストの高い手法を採用している。

そこで本論文では、積雪を“積雪を妨げる遮蔽物”、“降下する雪の不規則な動き”、“積雪後の雪の移動”の3つの要素からなる単純なモデルで表現し、グラフィックスハードウェアの機能を利用して高速に積雪形状をモデリングする方法を提案する^{9),10)}。このうち“遮蔽物の有無”と“降下する雪の不規則な動き”の影響を積雪形状に反映するために、Zバッファを用いたシャドウマップ法を応用する。また“積雪後の雪の移動”による積雪形状の変化は、雪を安息角¹¹⁾に基づいて安定した位置に移動させることによって再現する。

このモデル化により、シーンを覆う雪の堆積形状の再現や遮蔽物下への雪の吹き込み、および落雪の表現が可能になる。一方このモデルでは、垂直に近い面への雪の付着や、冠雪、雪庇、および樹氷などの現象を再現できない。これらはいずれも雪の下部に支持物体が存在しない状態であり、これらを再現するには雪の粘着力を考慮する必要がある。しかし、現時点ではそのモデル化を行っていない。また風の影響についても、現時点では実装を行っていない。

2. 積雪形状生成アルゴリズム

提案手法はシーンを真上に平行投影した画像上において積雪量の分布を求め、それをもとに積雪形状データの生成を行う。この手法では複雑なシーンでも積雪形状を容易に得ることができ、その精度を画像の解像

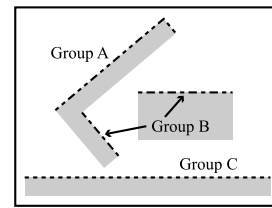


図1 ポリゴンのグループ化
Fig. 1 Grouping of polygons.

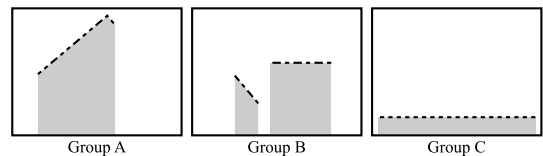


図2 グループごとの積雪可能領域
Fig. 2 The snow coverage possible area for every group.

度により制御することが可能である。また、この積雪形状のデータはシーンの形状データと分離して得ることができる。

以降、この具体的な手順について述べる。ここで対象のシーンはポリゴンで表現されているものとする。

2.1 積雪可能領域の判定

シーン中のオブジェクト表面上に積雪形状を生成するために、最初に重力によって積雪可能となる領域を求める。これを積雪可能領域と呼ぶことにする。これは表が“上方”を向いているポリゴンを選ぶことによって求めることも可能だが⁷⁾、本研究では、この判定にZバッファ法による隠面消去処理アルゴリズムを応用した。

- (1) シーン中のポリゴンを、シーンを真上から見て互いに重ならないものどうしてグループ化する。たとえば、図1においてGroup Bのポリゴンは異なるオブジェクトに属しているが、これらはシーンの真上から見たときに重ならないため、同一のグループとすることができる。
- (2) シーンを真上から見たときの、この各グループの平行投影像に対して、Zバッファ法による隠面消去処理を行う(図2)。

こうして得られたZバッファの内容の後方面以外の領域が、そのグループの積雪可能領域となる。これを求める積雪形状の基本形状とするため、このZバッファの内容を積雪量マップとして保存する。積雪形状は、この上に“積雪量”のデータを累積して作成する。

なお、ポリゴンのグループ化は隠面消去処理の手法などを応用すれば自動化が可能だと思われるが、本論文の実験ではシーンのモデリング時にあらかじめグループ化を行ったデータを用いた。

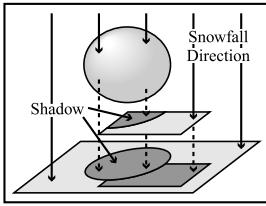


図 3 影付け処理を応用した遮蔽物検出
Fig.3 Obstacle detection by shadowing.

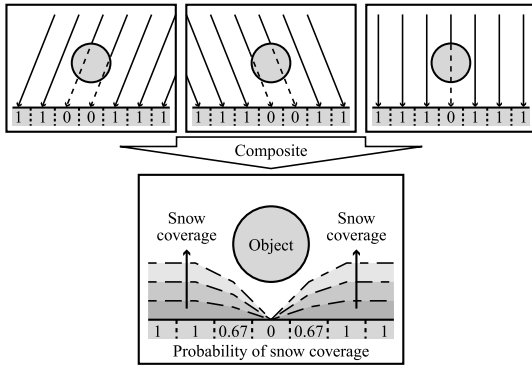


図 4 多数の降雪方向における影の領域の合成
Fig.4 Composition of the shadow region in many directions of snowfall.

2.2 積雪確率分布の算出

仮に雪が全天から均等に降り注いだとしても、前節で求めた積雪可能領域のすべてに雪が到達するわけではない。遮蔽物や気流の影響による揺らぎなどにより、積雪可能領域に到達する雪の量は不均一となる。そこで積雪可能領域に雪が到達する割合を、積雪可能領域上の確率分布として求める。これを積雪確率分布と呼ぶことにする。

2.2.1 遮蔽物の判定方法

積雪確率分布の算出に用いた基本的なアイデアは、影付け処理にある。すなわち、降雪の方向を光の入射方向として影付け処理を行い、得られた影の領域を遮蔽物により雪が到達しない領域とする(図3)。

2.2.2 降下する雪の不規則な動きへの対応

実際に降る雪の動きは直線的なものではなく、気流の影響などにより不規則なものとなる。その結果、前節で求めた影の領域の内部にも、雪が到達する場合があります。これを再現するために複数の降雪方向に対する影の領域を求め、それらを合成する(図4)。

ここで降雪方向は、主たる降雪方向を平均値とする2次元正規分布となる乱数を用いて決定する。この処理により、遮蔽物の影の境界付近における積雪確率のなだらかな変化が再現される。

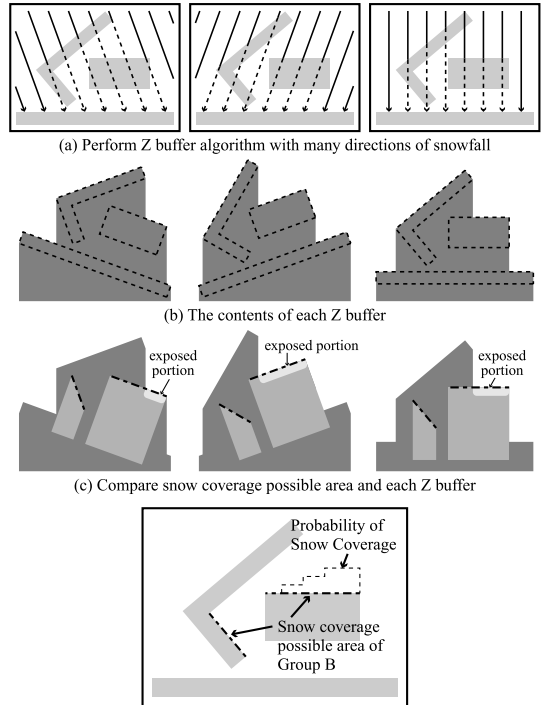


図 5 シャドウマップを用いた積雪確率の算出
Fig.5 Calculation of the snow coverage probability using the shadow map.

2.2.3 シャドウマップ法の応用

積雪確率を算出する対象となる積雪可能領域は平面ではない。異なる積雪可能領域の間には遮蔽関係が存在する場合がある。このため実際に積雪確率を算出する手続きは、もう少し複雑になる。本研究では、これにシャドウマップ法を用いる。図1のシーンに対してこの処理を実行した場合を図5に例示する。

- (1) まず、特定の降雪方向から見たシーン全体の隠面除去処理を行い(図5(a)), Zバッファの内容を得る(図5(b))。
- (2) 各積雪量マップの積雪可能領域を隠面除去処理の際の視線方向に座標変換し、Zバッファと比較して露出部分を求める。図1のGroup BとZバッファを比較する場合を図5(c)に示す。
- (3) この処理を複数の積雪方向に対して実行し、露出部分を合成する(図5(d))。以上により積雪可能領域上の積雪確率分布を得る。

2.3 降雪処理

2.2節において求めた積雪確率分布に基づき、積雪可能領域上の各点における積雪量を決定する。ある点 a の積雪確率を P_a 、ある時刻 t における降雪量を $M(t)$ 、とするとき、降りはじめからの経過時間 T に

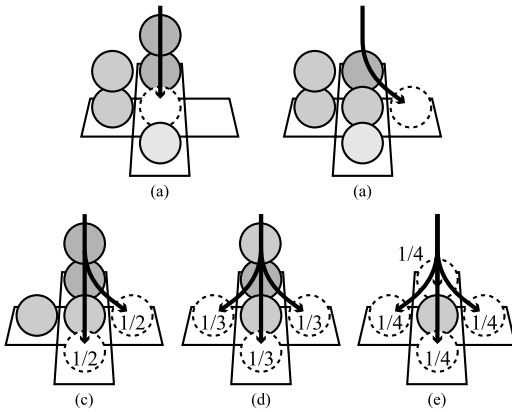


図 6 着地後の雪の移動方法

Fig. 6 The move method of the snow after landing.

対するその点の積雪量 $S_a(T)$ を、次式により求める。

$$S_a(T) = \int_0^T P_a M(t) dt \quad (1)$$

これをもとに一定の時間間隔における積雪量の増分を求め、それをすべての積雪量マップの積雪可能領域上に累積していく。なお、この累積によって積雪可能領域の高さが変化するため、実際には P_a も時間とともに変化するが、積雪形状の変化をアニメーション表示している間は、これを定数として取り扱う。

2.4 積雪後の雪の移動

積雪可能領域上の各点の積雪量の増加によって、ある点とその近傍の積雪量の差が大きくなると、積雪形状が不自然になってしまう。そこで積雪後の形状が安定した形状となるように、その点と近傍の積雪量を平滑化する。本研究では粒子堆積の手法¹²⁾を用い、増加した雪をより安定な位置に移動することによって、この処理を実行する。

2.4.1 安定化処理

安定化処理では、目標点と、それに隣接する4点との積雪量の関係をもとに、より安定な場所に雪を移動する。本研究では図6に示す移動方法を採用した。

- (1) 隣接する4点のそれぞれの積雪量と目標点の積雪量とで決まる傾斜が、いずれも安息角を超えない場合は、雪を移動しない(図6(a))。
- (2) 隣接する4点のそれぞれの積雪量と目標点の積雪量とで決まる傾斜のうち、いずれか1つが安息角を超える場合は、その点に雪を移動する(図6(b))。
- (3) 隣接する4点のそれぞれの積雪量と目標点の積雪量とで決まる傾斜のうち、2つ以上が安息角を超える場合は、それらの点に雪の量を均等に分配して移動する(図6(c)~(e))。

2.4.2 落下処理

安定化処理による雪の移動先が積雪可能領域から外れる場合には、雪の落下処理を行う(図12)。

これは、ある積雪量マップの積雪可能領域から、別の積雪量マップの積雪可能領域へ雪を移動させる処理になる。移動させる先の積雪量マップには、雪を落下させる位置に落下元より低い積雪可能領域を持つものの中から、その高さが最も高いものを選ぶ。

2.5 積雪形状データの作成

こうして得られたすべての積雪量マップから、積雪形状のデータをポリゴン形式で生成する。これをシーンと一緒に視点方向からレンダリングすれば、積雪景観の画像を得ることができる。

3. 実験と評価

提案手法を実装し、いくつかのシーンに対して積雪量を増加させつつリアルタイムアニメーションの生成を行った。また、積雪確率の算出にレイキャスティング法に準じた手法⁷⁾を実装し、提案手法との比較を行った。

3.1 使用機器

実験に使用したコンピュータの仕様は、CPU: INTEL Pentium III 800 MHz, メインメモリ: 384 MB, ビデオコントローラ: nVIDIA GeForce2 MX, ビデオメモリ: 32 MByte, OS: Microsoft Windows XP Home Edition である。またプログラムは Microsoft Visual C++ 6.0 を用いて作成し、画面表示には OpenGL 1.1 および GLUT 3.7 を用いた。

3.2 リアルタイムアニメーション表示

テーブル状のオブジェクトを含むシーンに対する積雪のアニメーション表示を行った結果を図7に示す。これは表示解像度を 300×300 画素, 100×100 画素の積雪量マップを2枚, 安息角を60度としたとき、同図左上から右下に至るまでの646フレームを、フォグ処理を行った状態で191.0秒(3.38フレーム/秒)で表示できた。また、このシーンでは安定化処理および落下処理によって、真上からの降雪に対してテーブルの下の領域にも積雪形状が作成されることが確認された。

図8に図形表示に用いたOpenGLのツールキットGLUTにあらかじめ用意されている基本形状を組み合わせたシーンに対して、提案手法を応用した例を示す。この場合、1つのオブジェクトを構成するポリゴンを複数のグループに分割することが困難なので、ポリゴンのグループ化はオブジェクト単位に行った。したがって積雪量マップをオブジェクト単位に作成する

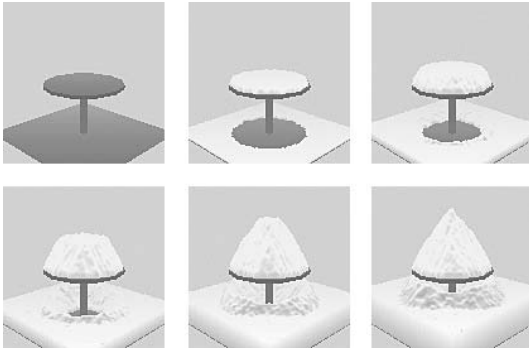


図 7 遮蔽物下への積雪

Fig. 7 Snow coverage under an obstacle.

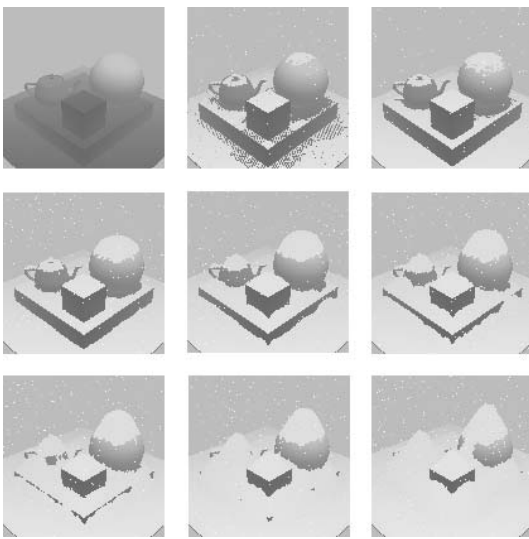


図 8 GLUT の基本形状を使ったシーンへの積雪

Fig. 8 Snow coverage on the GLUT primitives.

ため、オブジェクトの自己遮蔽部分に対する積雪形状を求めることができない。しかし自己遮蔽部分以外では、オブジェクトの内部構造を知ることなく積雪形状が得られる。このシーンでは表示解像度を 300×300 画素、 128×128 画素の積雪量マップを 5 枚、安息角を 45 度としたとき、同図左上から右下に至るまでの 1,318 フレームを、フォグ処理を行った状態で 185.9 秒 (7.09 フレーム/秒) で表示できた。なお、図 8 では降雪表示を行っているが、これらの時間は降雪表示を行わない状態で計測した。

図 9 に汎用的な形状データファイル形式として用いられている DXF で表現されたシーン (三角形数 12,646, 積雪形状データは含まず) に対して、提案手法を応用した例を示す。このデータファイルの作成には MetasequoiaLE を用いた。提案手法ではこのよう

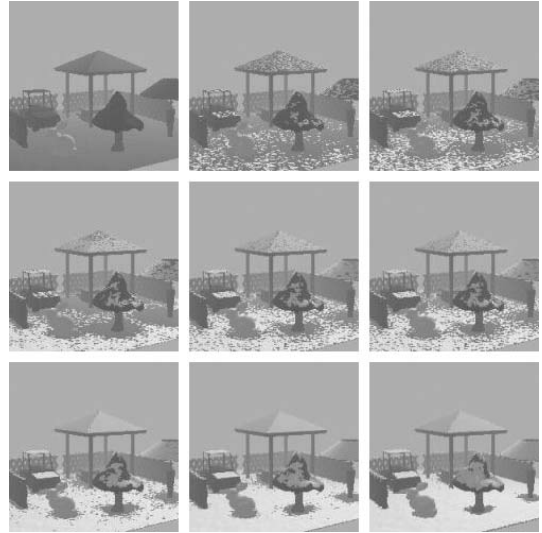


図 9 DXF ファイルのオブジェクトを使ったシーンへの積雪

Fig. 9 Snow coverage on the DXF objects.

に任意の複雑なシーンに対しても、容易に積雪形状を求めることが可能である。このシーンでは表示解像度を 300×300 画素、 200×200 画素の積雪量マップを 2 枚 (地面とそれ以外)、安息角を 45 度としたとき、同図左上から右下に至るまでの 96 フレームを、フォグ処理を行った状態で 30.9 秒 (3.11 フレーム/秒) で表示できた。

3.3 従来手法との比較

次に、レイキャスティング法を用いて積雪確率の算出を求める手法を実装し、同一データを用いて計算時間の比較を行った。

比較対象として実装した手法では、シーン中のポリゴンの各頂点から上方に向かってレイを飛ばして、降雪をさえぎる物体の探索を行う⁷⁾。その際、1つの頂点から揺らぎを持たせて複数本のレイを飛ばすことによって、その頂点における積雪確率を求める。この手法は積雪確率を頂点単位に求めるため、提案手法に対して必ずしも等しい条件の下での比較とはなっていない。

図 10 および図 11 の (a), (b) のシーンは、それぞれ 1,600 枚および 5,114 枚の三角形で構成されている。これらのシーンに対して、レイキャスティングの手法を用いた場合と提案手法を用いた場合の、積雪確率分布の算出に要した時間を表 1 に示す。提案手法はレイキャスティングによる方法に比べて、積雪確率分布を非常に高速に算出できる。

特にシーンを構成するポリゴン数の増加に対しては、何の高速化手段も用いないレイキャスティングによる

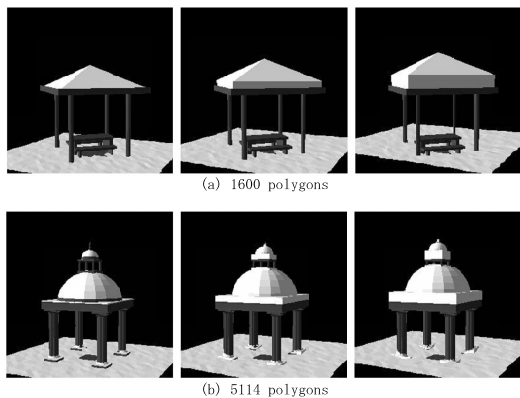


図 10 レイキャスティング法を用いた場合
Fig. 10 The case of using ray casting method.

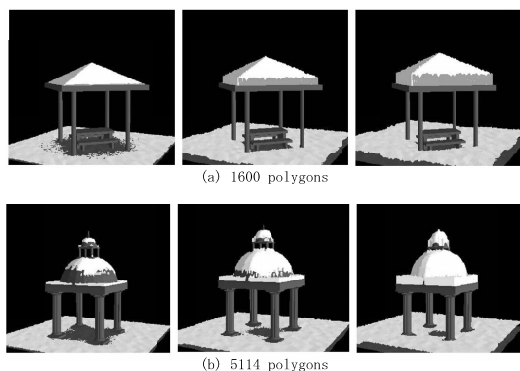


図 11 提案手法を用いた場合
Fig. 11 The case of using proposed method.

表 1 積雪確率の計算時間

Table 1 Computation time of the snow coverage probability.

Ray casting method	Scene	Number of rays	Processing time (sec.)
Ray casting method	図 10 (a)	3	4.917
		5	7.841
		10	15.062
	図 10 (b)	5	158.347
Proposed method	Scene	Number of projections	Processing time (sec.)
Proposed method	図 11 (a)	5	0.391
		5	0.451

方法では処理時間がポリゴン数の2乗に比例することが予想されるが、表1の結果はそれを裏付けるものとなっている。

一方提案手法では、シーンのポリゴン数の増加に対する処理時間の増加が低く抑えられている。これはポリゴン数に依存する処理となるZバッファ法による隠面消去処理が、隠面消去処理ハードウェアによって高

速に実行されるために、ポリゴン数には依存しないZバッファの内容のCPU側への読み出しや、複数のZバッファの合成に要する時間が相対的に大きくなっているためである。

なお、提案手法では複数の方向にシーン全体を投影して得たZバッファの内容を合成するが、レイキャスティングによる方法では頂点ごとにランダムな方向にレイを飛ばすため、提案手法による投影の回数とレイキャスティングによる方法のレイの数の間には、比較すべき関連はない。また、図10に示すレイキャスティングによる方法の生成画像では、積雪部分の境界が固定してしまっているが、これは処理の最初の段階で上面を向いたポリゴンのみを積雪の対象としていることに起因する。

4. 検 討

本章では、前節で比較したデータを基に処理時間、生成画像、および良好な結果を得るためのユーザの関与について検討を行う。

4.1 提案手法の特徴

- (1) 対象とするオブジェクトグループの数の分だけ、積雪領域決定および積雪確率決定に要する処理が増える。
- (2) 処理時間が対象とするオブジェクトのポリゴン数にあまり依存しない。
- (3) 積雪確率によって積雪量を加算させるかどうかを決定するため、時間の経過にともなう積雪形状の変化が再現できる。
- (4) 木の葉などの細かい物体は、Zバッファの画素に対して小さすぎるため、取扱いが難しい。

この最後の場合は、1枚の葉ごとに独立した積雪量マップを用いるより、木全体で1つの積雪量マップを用意したほうが良い。ただし、このようなポリゴンのグループ化は、現時点では自動化していない。

積雪形状の品質（精度）は、積雪場所を決定する際の投影面の解像度によって制御できる。また、積雪確率を求める際に用いる投影面の数を増やすことによって、積雪形状の品質を向上させることができる。

また、安定化処理により積雪形状を決定しているため、不自然な形状にはなりにくく、安息角に基づいた積雪形状が生成可能である。

4.2 比較対象の手法の特徴

- (1) レイの本数と計算時間はほぼ比例関係である。
- (2) ポリゴン数が増えると計算時間が飛躍的に増える。これは、ポリゴン数の2乗回の交差判定計算が必要となるためである。

- (3) 最初の段階で積雪対象となるポリゴンとならないポリゴンを決定するため、積雪形状の輪郭線はつねに一定の形状となる。

この手法はレイの数を増すことで積雪形状の品質向上を図ることが可能だが、レイを増加させればそれに比例した処理時間が必要になる。また、ポリゴンを細分化することで積雪形状の品質を向上させることも可能だが、交差判定計算がポリゴン数の2乗回必要になるため、処理時間の大幅な増加を招いてしまう。最適な細分化を行うことによって処理量を軽減できるが、細分化を行うユーザがアルゴリズムを理解している必要があり、簡単な作業とはならないと予想される。

また、提案手法において実装した安定化処理に相当する手段が採用されていないため、ある一定以上の積雪量になると不自然な積雪形状になる。

5. 今後の課題

本章では本研究の目標である積雪形状の高速なモデリングに関して、残された課題について検討を行う。

5.1 落下処理における雪の移動先判定の高速化

現在の実装では、安定化処理にともなう雪の移動によって雪が1つのオブジェクトの積雪可能領域から外れたとき、すなわち雪がそのオブジェクトから落下するときに、雪の落下地点にあるオブジェクトの探索を総当たりで行っている。このため、シーンが複雑になれば、この検索に要する時間が無視できないものとなる。これは以下に述べる手法により高速化することが可能である。

- (1) 移動先の積雪可能領域の判定を高速化するために、あらかじめシーン全体を真上から見た平行投影像の隠面消去画像を求めておく。この画像の各画素の値には、そのポリゴンが属するグループの積雪量マップの識別子を格納する(図12)。
- (2) 雪の移動先が積雪可能領域でなければ、この画像を参照して、雪を落下させる積雪可能領域を判定する。もし、判定した雪の落下地点の高さが雪の移動元より高ければ、他のグループの積雪可能領域の中から、雪を落下させることが可能なものを探す。

5.2 グラフィックスハードウェアの機能の応用

提案手法は積雪確率分布あるいは積雪量マップを操作して積雪形状を決定する手法である。現在の実装では積雪確率分布の算出にZバッファを利用しているにすぎないが、テクスチャの操作や動的な加工は、最近のグラフィックスハードウェアであれば、その機能を用いて実装することが可能である。たとえば安定

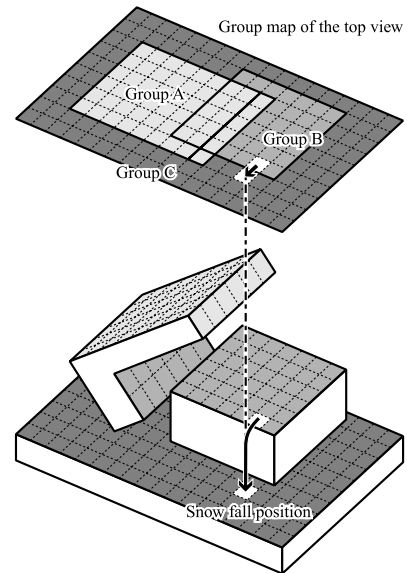


図 12 雪の落下処理

Fig. 12 Snow fall processing.

化処理はフラグメントシェーダ上に実装が可能であると考えられ、積雪量マップからの積雪形状の生成にはディスプレイメントマッピングあるいはパーテックスシェーダの機能を用いて実装が可能であると考えている。

6. おわりに

本論文では、任意のシーンに対応可能な積雪形状の高速なモデリング手法の提案を行った。この手法は積雪形状の生成を簡単かつ高速に行うために、積雪という現象を“積雪を妨げる遮蔽物”、“降下する雪の不規則な動き”、“積雪後の雪の移動”の3つに絞ってモデル化している。提案手法はこれらから積雪形状を求めるアルゴリズムにZバッファ法を応用し、シーン中の積雪可能領域の判定や積雪を妨げる遮蔽物の判定にグラフィックスハードウェアの機能を利用して高速化を図った。なお、遮蔽物の判定にはシャドウマップ法を応用している。

また、本論文では類似研究による手法の実装を行って、本研究の意義の検証を行い、提案手法が比較対象の手法に対して積雪形状を決定するまでの時間を大幅に短縮できることを確認した。加えて、提案手法ではユーザが元のシーン形状に手を加えることなく、投影面の解像度によって生成画像の品質を制御できることを示した。

このように提案手法は、類似研究が提案するレイキャスティング法を応用した手法に対して、処理時間がガ

リゴン数にあまり依存しない高速なアルゴリズムである。したがってバーチャルリアリティやゲームなどの高速な処理が必要とされる場での応用が期待される。

本研究の今後の課題には、雪の粘着力をモデル化して冠雪や雪庇などの現象を再現すること、融雪や雪の圧縮をモデル化して時間経過にともなう形状の変化を再現すること、形状の風の影響をモデル化して風向による変形を積雪形状に再現すること、およびグラフィックスハードウェアの機能を利用してさらに高速化を図ることなどがあげられる。このうち冠雪や雪庇については、“積雪後の雪の移動”に処理を追加することにより表現可能であると考えている。

一方、提案手法はシーンを垂直方向に平行投影して雪の落下点を決定するために、垂直面への雪の到達を再現できない。したがって垂直面への雪の付着や樹氷を再現するには、別の手法を導入する必要がある。また風の影響を反映する処理は、積雪確率を算出する際に投影面の方向を風向きによって変更することにより実装できると考えている。

複数の積雪領域を持つときの安定化処理の高速化については、現在の安定化処理のアルゴリズムが収束計算の手法を用いており、他の処理に比べて全体の計算時間における比重が非常に大きい。安定化処理の対象となる積雪量マップは一種のテクスチャであるため、この処理をプログラム可能なグラフィックスハードウェア上に実装することによって、提案手法のさらなる高速化が期待できる。

謝辞 本論文の執筆にあたってさまざまにご示唆・ご教示をいただいた関西学院大学理工学部情報科学科北橋忠宏教授につつしんで感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 村岡一信, 千葉則茂: 融雪のビジュアルシミュレーション, 画像電子学会誌, Vol.27, No.4, pp.327-338 (1998).
- 2) 小田泰行, 村岡一信, 千葉則茂: 仮想粘土の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1142-1150 (2001).
- 3) 松宮雅俊, 竹村治雄, 横矢直和: 自由形状モデリングのための陰関数曲面を用いた仮想粘土細工システム, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1151-1160 (2001).
- 4) Nisita, T., Iwasaki, H., Dobasi, Y. and Nakamae, E.: A Modelling and Rendering Method for Snow by Using Metaballs, *EUROGRAPHICS*, Vol.16, No.3, pp.357-364 (1997).
- 5) 村岡一信, 千葉則茂, 太田原功: 冬季の近接景観のシミュレーションのための積雪モデル, テレビジョン学会誌, Vol.49, No.10, pp.1252-1258 (1995).
- 6) Fearing, P.: Computer Modeling Of Fallen Snow, *Proc. SIGGRAPH 2000 Conference*, pp.37-46, ACM (2000).
- 7) 田村真智子, 太田 真, 藤田邦彦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂: 異方性 3次元テクスチャとディスプレイメント・マッピングによる積雪景観の表現法, 電気関係学会東北支部連合大会論文集, p.245 (2001).
- 8) 太田 真, 田村真智子, 藤田邦彦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂: 異方性 3次元テクスチャを用いた森林と積雪景観の表現法, 画像電子学会研究会予稿, Vol.188, pp.7-14 (2001).
- 9) 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, 情報処理学会第 64 回全国大会論文集, Vol.4, pp.735-736 (2002).
- 10) 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, Vol.2002, No.77, pp.109-114 (2002).
- 11) 田口善弘: 砂時計の七不思議—粉粒体の動力学, 中央公論社 (1995).
- 12) DeLoura, M. (Ed.): *GAME PROGRAMMING GEMS*, Charles River Media (2000). 狩野智英 (訳): 株式会社ボーンデジタル。

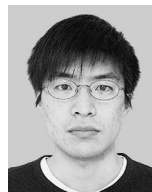
(平成 17 年 3 月 17 日受付)

(平成 18 年 2 月 1 日採録)



床井 浩平 (正会員)

昭和 36 年生。昭和 61 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科情報工学系修士課程修了。同年和歌山大学経済学部助手。平成 8 年和歌山大学システム工学部助教授。博士 (工学)。コンピュータグラフィックス等の研究に従事。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, ACM 各会員。



森木 大樹

昭和 54 年生。平成 15 年和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程修了。同年 (株) 島精機製作所入社。リアルタイムコンピュータグラフィックスの研究に関心を持つ。