

第6章

積雪のレンダリング法

6.1 まえがき

第3章および第4章で示した、積雪形状の生成手法が出力する形状データはボクセル表現による2値情報である。これを1と0で表し雪の密度とみなしてボリュームレンダリングを適用しても、霧のような境界が曖昧な画像しか得られない。実際の積雪では、「新雪」では表面に浅い凹凸が見られ綿のような柔らかい印象を受ける。降雪してから時間が経過した「しまり雪」や「ざらめ雪」では、表面に丸みを帯びた氷の粒が見られ、やや堅い印象を受けるようになる。氷粒は晴天時に日射を強く反射し、積雪表面に無数の明るい点が観察されるようになるなどの顕著な特徴がある。ここでは、このような雪の特徴を表現するための積雪レンダリング法を示す。

6.2 積雪レンダリングの概要

本手法では、まず、積雪表面の境界を明確に表現できるように、これをポリゴンで表す。

このポリゴンは、次のように積雪のボリュームデータから求める。

- (1) 積雪のボリュームデータと同じサイズの3次元配列を用意する。
- (2) 3次元配列の各要素には雪ならば1.0、空ならば0.0を設定する。
- (3) この3次元配列全体に $3 \times 3 \times 3$ の空間フィルタを数回(1~3回)かけ、雪の形状をぼかす。
- (4) 適当な閾値(0.3~0.7程度)で、3次元配列から4面体分割法[13]により積雪境界面の

ポリゴンデータを求める。

このポリゴンをシェーディングすることによって、積雪表面の明確な境界を表現できるようになる。

次に、積雪の表面を表すポリゴン1枚1枚に、氷粒の模様を描いた鏡面反射用2次元テクスチャを貼る。これにより、実際の積雪表面に見られる氷粒による強い反射を表現することができる。

積雪表面の微細な陰影は、積雪を構成する氷の複雑な形状、分布を反映しているものと思われるが、このような積雪の複雑な内部構造を形状データとして再現することは非常に困難であると思われる。このため、本手法では $1/f$ ノイズによる3次元テクスチャによってこれを表現する。この3次元テクスチャは次のように逆離散フーリエ変換を用いて作成する。

- (1) 周波数領域を表す3次元配列を用意する。
- (2) 雑音のパワースペクトルの大きさを周波数に逆比例させ3次元配列に設定する。
- (3) 3次元配列に逆離散フーリエ変換をほどこす。
- (4) 3次元配列の要素値が0.0から1.0の範囲となるように正規化する。

この3次元テクスチャは、積雪の存在する範囲、すなわち、ポリゴンで表された積雪表面を包含するように配列する（図3.6参照）。

積雪の内部は、1次散乱を考慮したボリュームレンダリングの手法によりレンダリングするが、多重散乱を考慮していないため、光量の不足など、表現力が低下することが考えられる。そこで、雪片のレンダリングに採用したシェーディング関数（(17)式）を散乱関

数として使用することにした。なお、この関数は（雪結晶のような）明確な面を持つ物体のシェーディングのためのものであるが、ここでは、 $1/f$ ノイズの3次元テクスチャの等密度面がその面に相当する効果を持つと仮定し適用した。

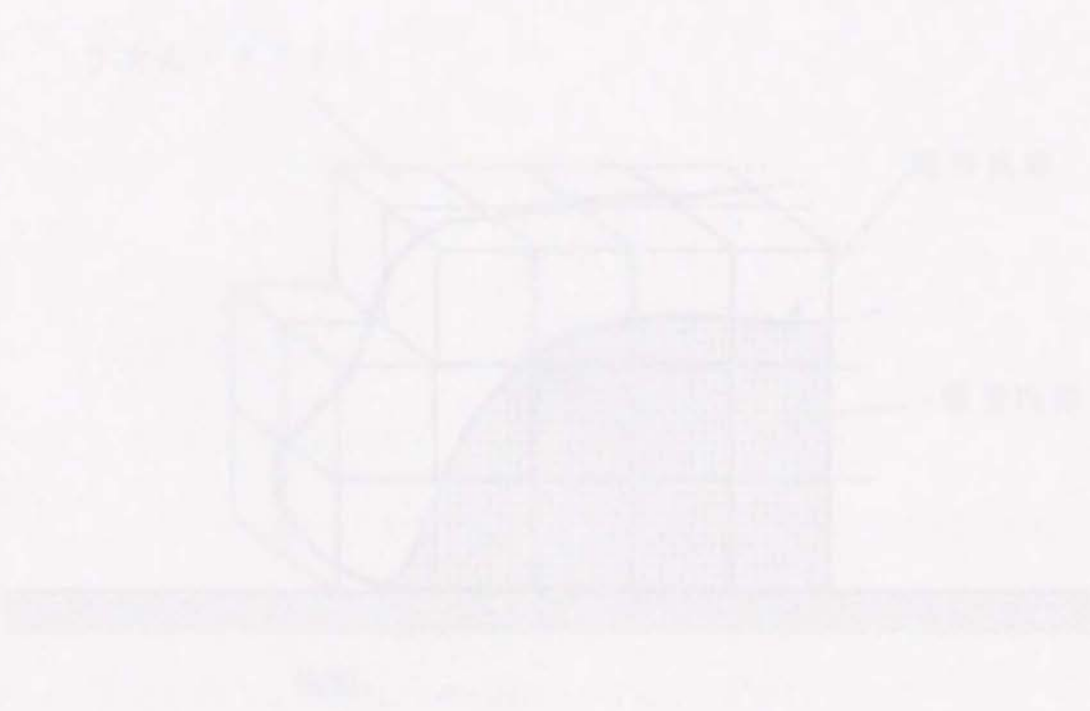


図 3.10 $1/f$ ノイズの3次元テクスチャの等密度面

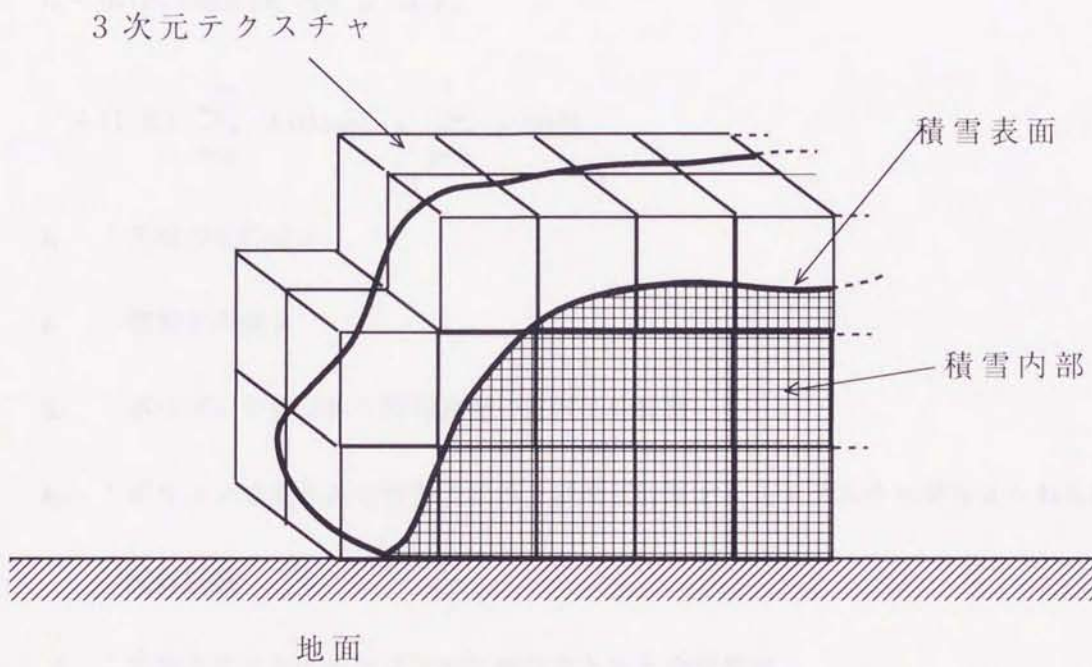


図36 1/fノイズ3次元テクスチャの配置

6. 3 積雪のレンダリングアルゴリズム

積雪のレンダリングは積雪の表面を表すポリゴンと、そのポリゴンそれぞれの表面にマッピングした鏡面反射用2次元テクスチャ、内部に周期的に配置した1/fノイズの3次元テクスチャからなる積雪データに対して行われる(図3.7参照)。

視点へ到達する光の強さ I_e は次式で表される。

$$I_e = I_0 (K_d \cos \theta + K_s \cos^n \psi) + I_a K_d + (1 - K_s) \sum_{t=t_{in}}^{t_{out}} \{ I(t) \exp(-\gamma \sum_{s=t_{in}}^t \rho(s)) \} \quad (26)$$

I_0 : 光源の光の強さ

I_a : 環境光の強さ

K_d : ポリゴンで表された積雪表面の拡散反射係数

K_s : ポリゴンで表された積雪表面の、鏡面反射用2次元テクスチャで与えられる鏡面反射係数

θ : 光源ベクトルとポリゴンの法線ベクトルとの成す角

ψ : 光源光の正反射ベクトルと視線ベクトルの成す角

n : Phong のモデルの係数

t_{in} : 積雪面への視線の突入点

t_{out} : 積雪面からの視線の脱出点

ρ : 1/fノイズ3次元テクスチャから得られる密度

(26)式の第1項は、積雪表面を表すポリゴンの陰影付けのためのものである。 K_s は鏡

面反射率を表し、氷粒のための2次元テクスチャで与えられる。第2項は、内部の雪の粗密を表す $1/f$ ノイズの3次元テクスチャに対するボリュームレンダリングである。

光線上の点の密度、法線は、 $1/f$ ノイズ3次元テクスチャのその点の近傍ボクセルの値から3次元線形補間により求める。なお、法線 (l で使用) は3次元 *Sobel* のオペレータにより密度勾配から求めている。

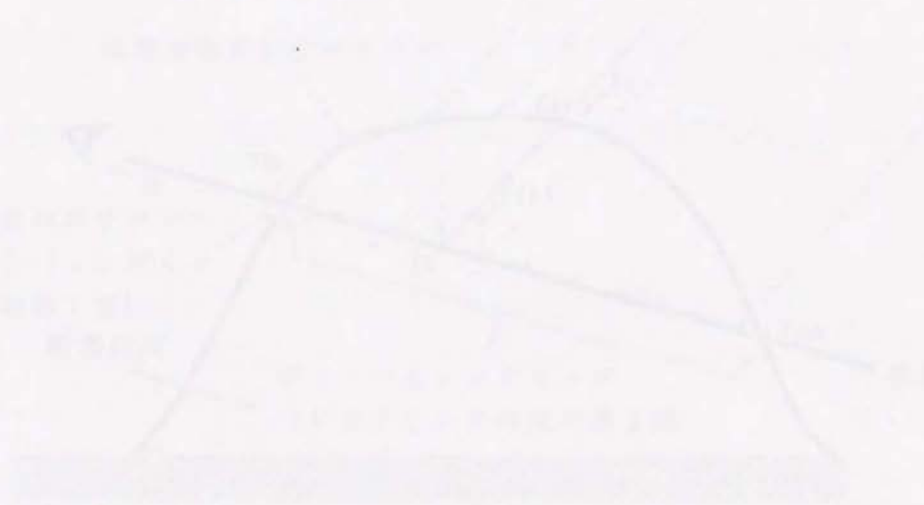


図 2.1 雪のレンダリング

5. 4 積雪レンダリング法の原理

4. 光源からの光線が積雪表面のポリゴンに当たると、その位置で反射・透過・屈折などが起こる。このとき、光線は積雪内部を伝播し、最終的に視線方向へ向かう。この過程をシミュレーションすることで、積雪の質感や色合いをリアルに表現することができる。

5. 積雪の質感を表現するために、積雪表面の凹凸や粒子の配置をモデル化する。これにより、光線が積雪表面を伝播する際の経路をより正確にシミュレーションすることができる。

6. 積雪の色合いを表現するために、積雪の成分や厚さを考慮する。これにより、積雪の色合いをよりリアルに表現することができる。

7. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

8. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

9. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

10. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

11. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

12. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

13. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

14. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

15. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

16. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

17. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

18. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

19. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

20. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

21. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

22. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

23. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

24. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

25. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

26. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

27. 積雪の質感や色合いをリアルに表現するために、積雪のレンダリング法を改良する。これにより、積雪の質感や色合いをよりリアルに表現することができる。

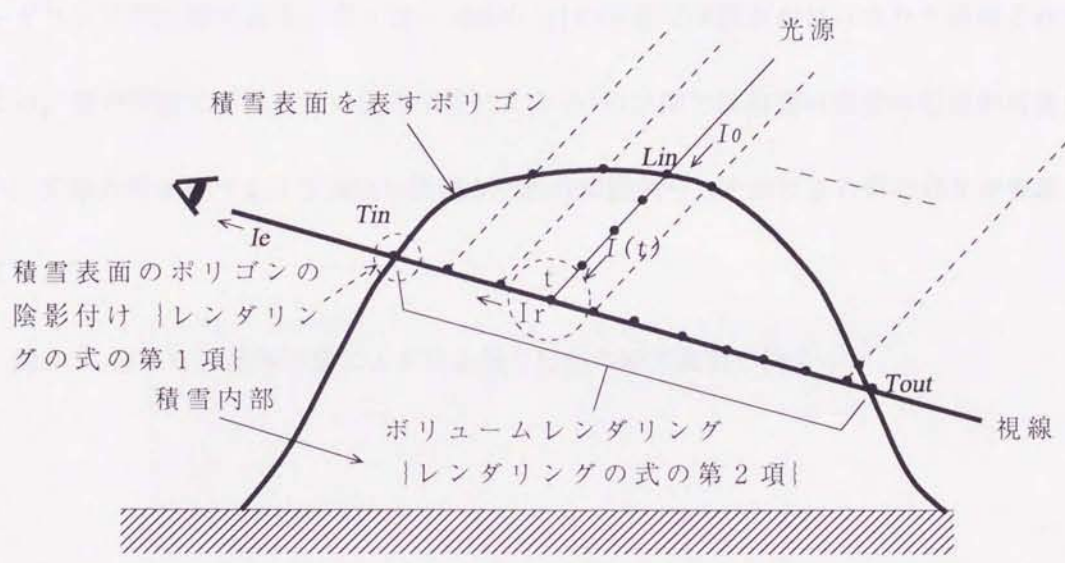


図37 積雪レンダリング法

6. 4 積雪レンダリングの実行結果

4. 6節の日射による融雪シミュレーション例(図12)の画像は積雪レンダリング法で生成したものであり、放射熱による融雪シミュレーション例(図13)は積雪表面を表すポリゴンのみにより生成した画像である。比較のため図38に積雪面を拡大表示した画像を示す。(a)は積雪表面を表すポリゴンのみによるレンダリング、(b)は本手法によるレンダリングの結果である。ポリゴンのみ(a)の画像では表面がはっきりと認識されてしまい、雪の質感とはほど遠い。本手法による(b)の画像では積雪の密度の粗密が可視化され、実際の雪が持つような表面の微細な凹凸の雰囲気や、それによる影の効果が表現されている。

図39、図40に画像合成による山小屋と灯籠の降雪風景の例を示す。



(a) ポリゴンによる表現



(b) 本手法

図 3 8 レンダリング法の比較



図 3 9 山小屋の降雪風景



図 4 0 雪の灯籠

6. 5 むすび

本章では、第3章および第4章で示した積雪形状の生成手法が出力する形状データを、リアルな積雪画像として表現する手法を示した。

本手法では、積雪形状データより積雪境界面を表すポリゴンを4面体格子法で求め、各々のポリゴンに積雪表面の氷粒を表す鏡面反射テクスチャをマッピングしている。さらに、積雪内部の氷の粗密を表す $1/f$ ノイズの3次元テクスチャを積雪の内部空間に配列し、これらを一次散乱を考慮したボリュームレンダリングの手法でレンダリングすることで、積雪の質感を表現している。

本手法により、雪の表面に特徴的な氷粒の反射や、積雪表面の微細な陰影を表現できることを画像生成例により示した。

第7章

結論

本論文では、雪景観映像生成のための降雪・積雪・融雪のビジュアルシミュレーション法を提案した。以下に、各章で示した手法とその特徴をまとめる。

まず、第2章では、気流の場の生成に渦場の手法を応用した、降雪のシミュレーション法を示した。本手法は雪片が受ける力として渦場による気流からの力とランダムな力、重力と空気抵抗を考慮し、オイラー法により振る舞いをシミュレーションする。渦場を調整することで静かに降雪する状態から激しく舞う状態まで表現することができ、本手法により生成した降雪の動画像の一部の画像によりその効果を示した。

第3章では、自然の積雪現象を文献よりまとめ、積雪形状の特徴について述べた。次に、積雪の特徴を表す積雪形状の生成法として、仮想の“気温”を形状制御パラメタとした、降雪直後の積雪形状を自動生成する積雪シミュレーション法を示した。本手法では雪雲内と地表付近の2つの仮想の気温パラメタのみで、降雪直後に形成される積雪形状を表現することができる。さらに、シミュレーション例により、仮想の気温と生成される積雪形状の関係について明確にした。

第4章では、まず、自然の融雪現象を文献よりまとめ、融雪シミュレーションに必要な要素を明確にした。次に、第3章の積雪シミュレーション法で生成した積雪形状を初期形状として、積雪表面の雪が受ける直達日射光や散乱日射光、物体からの放射熱の計算法、および積雪内部の熱伝搬シミュレーション法を示し、これによる融雪した積雪形状の自動

生成法を示した。さらに、融雪のシミュレーション例により、直射日光の影響を受けた積雪や、物体からの輻射熱の影響を受けた積雪形状が生成されることを示した。

第5章では、まず、3次元テクスチャ法に基づく降雪雪片専用のレンダリング法を示した。次に、降雪雪片のような微細な表面構造を持つ物体一般を表現するための従来の3次元テクスチャ法は、異方性について十分考慮されていないことを指摘し、それを解決する基本型異方性3次元テクスチャ法と改良型異方性3次元テクスチャ法を示した。これらが異方性を実現していることを画像生成例により示し、さらに、基本型より改良型の方がデータ量が少なく、かつ、データ量削減による画像への影響も少ないことを明らかにした。

第6章では、まず、積雪表面の特徴を述べ、次に、積雪シミュレーション法および融雪シミュレーション法により得られた積雪のボリュームデータから、リアルな積雪の質感を表現するための積雪レンダリング法を示した。本手法は1次散乱のみのボリュームレンダリング法に基づくが、1次散乱のみであっても積雪内部の密度の揺らぎを考慮(1/f ノイズで表現)し、積雪内部の反射関数を工夫することでリアリティの高い画像が得られることを、画像生成例により示した。

今後の課題としては、融雪のシミュレーション法において融雪水を扱えるように拡張し、積雪内の雪の降るまいを考慮した積雪の変形シミュレーションや、融雪水に伴う現象、例えばつららの成長や、再凍結による氷を含む積雪の質感表現法の開発などがあげられる。また、現在は独立した手法である降雪シミュレーションと積雪シミュレーションを結合し、降雪と積雪が相互に影響を及ぼし形成される積雪形状(吹き溜まりの雪や山岳の尾根に発生する雪庇など)の生成法などもあげられる。さらに、クリープ現象のような融雪の移動

シミュレーションも興味深い。

謝辞

本研究を行うにあたり，終始懇切なご指導をいただいた岩手大学工学部情報工学科千葉則茂教授に謹んで感謝の意を表します。また，有益な御討論，御助言を賜りました岩手大学工学部情報工学科高浪五男教授，三浦守教授，土井章男助教授に心から感謝申し上げます。

更に，日頃より御協力をいただいた，岩手大学工学部情報工学科名須川徳博技官に感謝いたします。

参考文献

- [1] 大野：山岳の表示（その2），PIXEL, No. 50, pp. 153-157, 1986
- [2] 高橋ほか：山岳景観の季節感のシミュレーション手法，情処学会，グラフィクスとCAD研究会報告, 93-CG-61-4, pp. 25-32, 1993
- [3] K.Sims： Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation, Computer Graphics, Vol.24, No.4, SIGGRAPH'90, pp.405-513, 1990.
- [4] 村岡，千葉，太田原：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，Vol49, No. 10, pp. 34-40, 1995
- [5] T.Nishita, H.Iwasaki, Y.Dobashi, E.Nakamae： A Modeling and Rendering Method for Snow by Using Metaballs, EUROGRAPHICS'97, Vol.16, No.3, pp.357-364, 1997.
- [6] 村岡，千葉：融雪のビジュアルシミュレーション，画像電子学会誌, 第27巻, 第4号, p. 327-337, 1998
- [7] 村岡，千葉，高橋，三浦：渦場と粒子による煙や炎の2次元CGシミュレーション，電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1735-1745, 1993
- [8] J.Takahashi, H.Takahashi, N.Chiba： Image Synthesis of Flickering Scenes Including Simulated Flames, IEICE Transactions on Information and Systems, VOLE80-D, No.11, pp.1102-1108, 1997
- [9] 若濱五郎：雪と氷の世界，東海大学出版会, 1995

- [10]前野, 福田: 雪氷の構造と物性, 古今書院, 1986
- [11]菊池, 大畑, 東浦: 降雪現象と積雪現象, 古今書院, 1995
- [12]小野, 石川, 新井, 若土, 青田: 雪氷水文現象, 古今書院, 1994
- [13]土井, 小出: 等関数値曲面生成のための4面体格子法, 第3回NICOGRAH論文コンテ
スト論文集, pp. 55-61, 1987
- [14]J.T.Kajiya, T.L.Key: "Rendering Fur with Three Dimensional Textures", Computer
Graphics, 23, 2, pp. 271-280 (1989).
- [15]木元, 大野: "拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示", 信学論, J75-D
- II (4), pp. 706-713 (1992).
- [16]木元, 大野: "テクスチャマッピングによる流水の質感表現", 情報処理学会「グラ
フィクスとCAD」研究会報告, 61-6, pp. 41-47 (1993).
- [17]細川, 村岡, 千葉: "3次元テクスチャによる森林景観のレンダリング法", 情報
処理学会「グラフィクスとCAD」研究会報告, 74-6, pp. 29-34, (1995).
- [18]N.Chiba, K.Muraoka, A.Doi, J.Hosokawa : "Rendering of Forest Scenery Using 3D
Textures", The Journal of Visualization and Computer Animation. Vol. 8, pp. 191-199 (1997).
- [19]村岡, 菊池, 千葉, 太田原: "テクセルの一効率的生成法", 画像電子学会誌, 第2
4巻, 第3号, pp. 206-215 (1995).
- [20]F.Neyret: "A General and Multiscale Model for Volumetric Textures", Graphics
Interface'95, pp. 83-91 (1995).
- [21]F.Neyret: "Modeling, Animating, and Rendering Complex Scenes Using Volumetric

- Textures", IEEE Visualization and Computer Graphics, Vol.4, No.1(1998).
- [22] T.Noma: "Bridging Between Surface Rendering and Volume Rendering for Multi-Resolution Display", Proc. Sixth Eurographics Workshop Rendering, pp.31-40(1995).
- [23] J.F.Blinn: "Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces", Computer Graphics, 16,3, pp.21-29(1982).
- [24] J.T.Kajiya, B.V.Herzen : "Ray Tracing Volume Densities", Computer Graphics, 18, 3, pp.165-174(1984).
- [25] 千葉, 土井: "3次元CGの基礎と応用", サイエンス社(1997).

発表論文

学会誌投稿論文

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 27 卷, 4号, pp.327-337(1998.10)
2. 村岡一信, 千葉則茂: “異方性3次元テクスチャ法”, 画像電子学会誌 28 卷, 2号, (1999.4) (採録予定)

研究会報告

1. 村岡一信, 千葉則茂: “方向性を考慮した3次元テクスチャ法”, 情報処理学会「グラフィクスとCAD」研究会報告, pp.7-12(1998.10)
2. 村岡一信, 千葉則茂: “雪のビジュアルシミュレーション”, NICOGRAPH/MULTIMEDIA'98論文コンテスト論文集, pp.54-65(1998.11) (優秀賞・国際奨励賞)

学会口頭発表

1. 村岡一信, 千葉則茂: “CGのための積雪モデルの詳細検討”, 平成8年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.79(1996.8)
2. 村岡一信, 千葉則茂: “CGのための融雪形状生成法”, 平成9年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.315(1997.8)
3. 村岡一信, 千葉則茂: “降雪のビジュアルシミュレーションのための雪粒子の行動モデル”, 平成10年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.247(1998.8)