

大規模球群リアルタイムアニメーションのための テンプレートテクスチャの部分マッピング

北山 暁子 藤代 一成[†] 平野 恒夫[‡]

お茶の水女子大学 大学院 人間文化研究科

[†]お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 [‡]お茶の水女子大学 理学部 化学科

〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

{kitayama@imv.is, fuji@is, hirano@chem}.ocha.ac.jp

パーティクルシステムなどに応用可能な、大規模球群を高速に描画する手法を提案する。粒子を球体として描画する際の問題の一つに、レンダリング計算コストに起因する描画の遅れがある。これを改善するために、ポリゴンによって近似した球を3次元的にレンダリングするのではなく、球の陰影を表した、異なる解像度のテンプレートテクスチャを予めテーブルに格納しておき、それらから光源やビューイングパラメータに依存した部分テクスチャを切出し、円盤状のビルボードにマッピングすることによって粒子を高速に描画する。そして、この手法の効果を検証するために、分子動力学計算によって得られた、数千個オーダーの粒子系の時系列データを用いてリアルタイムアニメーション作成を試みる。

キーワード： テクスチャマッピング、ビルボード、テンプレートテクスチャ、
パーティクルシステム、リアルタイムアニメーション、分子動力学

Partial Mapping of Template Textures for Realtime Animation of Large-Scale System of Particles

Akiko Kitayama Issei Fujishiro[†] Tsuneo Hirano[‡]

Graduate School of Humanities and Sciences

[†] Department of Information Sciences, [‡] Department of Chemistry
Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

{kitayama@imv.is, fuji@is, hirano@chem}.ocha.ac.jp

This paper proposes a method for fast display of a large-scale system of particles. To alleviate the temporal complexity of 3D rendering of geometrically-represented spheres, the method renders each sphere by extracting an appropriate partial texture analytically from the multi-resolution template texture table for shaded sphere, according to the position relative to a light source and viewing-related parameters, and maps the extracted texture onto a disc-shaped billboard. The effect of the present method is proven with an application to the realtime visualization of a 4D molecular dynamics data set comprising a thousand particles.

Keywords : Texture mapping, billboard, template texture, particle system,
realtime animation, molecular dynamics.

1 はじめに

3次元コンピュータグラフィクス(3DCG)の分野で大規模粒子群を扱うアプリケーションとして、パーティクルシステムによるビジュアルエフェクト[4][5]や粒子追跡法による3D流れ場の可視化[6][7],分子動力学[8]に代表される粒子シミュレーションなどが知られている。近年のコンピュータハードウェアの発展に伴い,大量の粒子群を高速にレンダリングすることが可能になってきた。しかしながら,数千から数万個オーダーの大規模粒子群をリアルタイムで表示することは,未だ困難な状況にある。

大規模粒子群を球体を用いて描画する際の問題の一つは,形状は単純ながらも球体を構成しているポリゴン数の積算が無視できないために起こるレンダリング計算コストの大きさにある。一般にポリゴン数を削減するためにビルボードを用いて,そこにテクスチャマッピングを施す手法が確立している[3]。また,建築学への応用として,概形を与えるポリゴン表現にテクスチャマッピングを施して複雑な形状を表現する手法も提案されている[1]。本論文では,これらの手法と同様に,ポリゴンによって近似した球を3次元的にレンダリングするのではなく,球の陰影を表した標準テクスチャ(テンプレートテクスチャ)から切出した部分テクスチャを円盤状のビルボードにマッピングすることによって,粒子の描画を高速化する。粒子の形状を球に限定すると,テンプレートテクスチャの中からの光源やビューイングパラメータに依存した部分テクスチャの抽出が解析的に行なえることを示す。そして,この手法を分子動力学解析のための対話的可視化に適用し,その効果を検証する。

まず次節で大規模粒子群のデータ構造の描画の定式化を行ない,本研究の方向性を示す。3節では,ビルボード+テクスチャマッピングによって球を表現し描画する手法について説明する。4節では,本手法を分子動力学の計算結果である数千個オーダーの大規模粒子群データに適用した結果を,通常のポリゴンによる描画法の結果と比較する。最後に5節でまとめと今後の課題で本論文を閉じる。

2 大規模球群の描画

一般に,大規模粒子群の時系列データの構造は,以下の式で表現することができる:

$$(ID_i, t, (x_i, y_i, z_i), \{p_i^j\}_{j=1, \dots, M})_{i=1, \dots, N} \quad (1)$$

(N: 十分大)

$$\left\{ \begin{array}{ll} ID_i & : i \text{ 番目の粒子の識別子} \\ t & : \text{時刻} \\ (x_i, y_i, z_i) & : i \text{ 番目の粒子の位置 (3D 座標値)} \\ p_i^j & : i \text{ 番目の粒子のもつ } j \text{ 番目の特性} \end{array} \right.$$

本論文では,それぞれの粒子を球体に限定することによって,データ構造を以下のように簡略化する:

$$(ID_i, t, (x_i, y_i, z_i), r(p_i^{j^1}), c(p_i^{j^2}))_{i=1, \dots, N} \quad (2)$$

(N: 十分大)

$$\left\{ \begin{array}{ll} r(p_i^{j^1}) & : \text{半径へのマッピング関数} \\ c(p_i^{j^2}) & : \text{色へのマッピング関数} \end{array} \right.$$

パーティクルシステムや3D流れ場の可視化などのアプリケーションで,粒子数 N が数千から数万個オーダーの時系列データをアニメーション表示する際には,複雑な計算によって得られる精巧な描画よりも,むしろ高速な描画によって可能となる対話性の方を重視するべきである。そこで,個々の粒子をいかに高速に描画するかということが問題になってくる。次節では,この問題を解決するために,テンプレートテクスチャの部分マッピングによって球を表現する手法について述べる。

3 テンプレートテクスチャの部分マッピング

一般に,3DCGによって球体を描画する場合,ポリゴンで近似した球体をモデルとして用いる。このようなソリッドオブジェクトをレンダリングするためには,ポリゴンを構成する全ての頂点について,視点と光源の位置からシェーディング計算を行い,オブジェクトの陰影を決定するため(図1),球のように形状は単純でも,ポリゴン数の積算が無視できない大量のオブジェクトセットのレンダリングには計算コストが多くかかる。

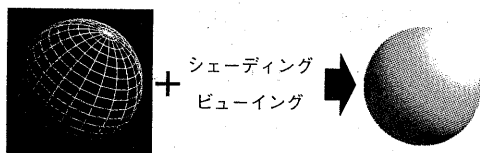


図 1: 球のモデリングとレンダリング

3.1 ビルボード+テクスチャ

そこで、2D の円盤状ビルボードをモデリングし、そこに球の陰影を表したテクスチャをマッピングすることによって球を表現することを考える (図 2)。全ての粒子を含む系を回転させるような場合には、ビルボードを常に視線に対して垂直に置くことで、ビルボードを常に円盤として表示する。

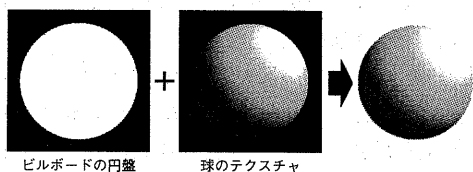


図 2: ビルボードの円盤+球のテクスチャ

しかし、粒子群の中をウォークスルーするような場合には、光源が固定されているとすると、視点の移動に伴って球の陰影が変化するので、陰影の異なる球体のテクスチャを複数枚用意しておいて、視点の位置によって参照するテクスチャを切り替える必要がある。ところが、視点の移動に伴って球の陰影が変化することに対応するために、陰影の異なる球のテクスチャを大量に格納しておくことは、テクスチャのエントリー数を爆発させる可能性があり、困難である。

そこで次項では、テクスチャを格納するテーブルの構成と、ビルボードにマッピングするテクスチャを決定する方法について述べる。

3.2 部分テクスチャの切出し

各々の粒子を表現するにあたり、ビルボードにマッピングするテクスチャを決定するために必要な項

目を以下の (a)~(c) に限定し、テクスチャの格納からテクスチャマッピングまでのプロセスを示す。

(a) 陰影の変化

図 3 のような、中心に向けて同心円状に輝度値の増加していくテンプレートテクスチャを考え、そこからテクスチャを切出すための範囲を決定することによって、疑似的に任意方向からの球の陰影を表すテクスチャを生成することを試みる。

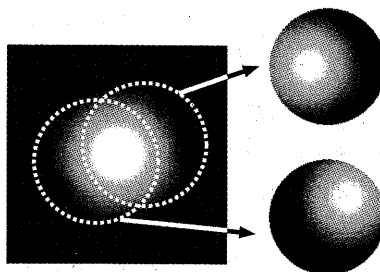


図 3: テンプレートテクスチャからの球の陰影の切出し

この方法によって、テクスチャメモリを浪費することなく粒子の陰影を変化させることができる。このようなテクスチャの切出しはあくまでも疑似的なものであり、実際の球体の陰影と正確に一致するわけではない。しかし、球群の全景を見渡すような場合には個々の球は数ピクセル単位で描画されるので、疑似的な陰影であっても、粒子を立体的に見せ、奥行き感を表現することは十分可能であると考えられる。

具体的にテクスチャ座標値は以下のように求める。球のハイライトの位置がテンプレートテクスチャの中央にくるように部分テクスチャを抽出する。このとき、円状部分テクスチャの中心 (x_{tex}, y_{tex}) を次のように求める (図 4)。球の中心から視点、平行光源へのベクトルをそれぞれ \vec{v} , \vec{a} とする。 \vec{v} , \vec{a} をそれぞれ xz 平面に投影させたベクトル \vec{e}_{xz} , \vec{f}_{xz} に対して、なす角 θ を求め (図 4(b)), x_{tex} を以下の式で求める。なお、 r は抽出する部分テクスチャの

半径を示している。

$$x_{tex} = 0.5 - r \times \sin \frac{\theta}{2}$$

同様に、 \vec{e} , \vec{f} をそれぞれ yz 平面に投影させて、図 4(c) のように y_{tex} を以下の式で求める。

$$y_{tex} = 0.5 - r \times \sin \frac{\varphi}{2}$$

$\sin \frac{\theta}{2}$, $\sin \frac{\varphi}{2}$ はそれぞれ、部分テクスチャの中心からテンプレートテクスチャのハイライトの位置までの x , y 方向の変位を表している (図 4(a))。

(b) マッピング関数への対応

個々の粒子を異なる大きさで描くためには、その大きさをビルボードの半径として与えればよい。しかし、数種類の粒子を色によって区別するためには、それぞれの粒子に対応する色の異なる複数枚の球体のテクスチャ画像を予め用意して、粒子によってマッピングするテクスチャを変えなければならない。そこで、(a) で示したようなテンプレートテクスチャを色数の分だけ予め用意し、格納しておく。なお、カラーモデルとして HSV モデルを採用することにより、H の値を変更することでさまざまな色相を表現することができる。これを利用して、格納するテンプレートテクスチャを 1 枚で済ませることも可能である。

(c) 解像度

粒子群の内部をウォークスルーするような場合や一部を拡大表示する際には、粒子はかなり大きく描画されることもある。そこで、視点と粒子間の距離や視点の移動速度に応じて、マッピングに使用するテクスチャの解像度 (LoD: Level of Detail) を適応的に切り替えることを考える [2]。つまり、粒子が小さく描画される場合には解像度の低いテクスチャを用い、大きく描画される場合には解像度の高いテクスチャを用いる。

このためには、予め参照テーブルとして格納するテクスチャのピラミッド構造を作成しておき、その中から参照するテクスチャを決めればよい。

4 分子動力学への応用

前節で示した手法を搭載した大規模球群のアニメーションシステムを構築するにあたり、分子動力学計算によって得られた粒子の位置座標の時系列データを用いて初期的実験を行なった。

分子動力学とは、系を構成する多数の原子や分子の集まりについて、ニュートンの運動方程式を適応し、その挙動を時系列で追跡する、ラグランジュ的アプローチの計算化学シミュレーションの一手法である [8]。一般に計算化学シミュレーションの計算結果は数値によって与えられるため、そのままでは解析が困難である。そのために、分かりやすい形で可視化することが必要不可欠であるが、一般に分子動力学計算によって得られる時系列データは、粒子の半径、種類、各粒子の描画色などが一定であるため、2 節の式 (2) の構造をもつデータを対象とした本論文の手法を直接的に適用することができる。また、データ解析のためには、各粒子の精巧な描画よりも、むしろ対話的な描画レートを維持することが重要であるため、本法による球群の高速レンダリングの評価対象として適当であると考えられる。

4.1 実装環境

使用したデータは、粒子の位置座標の時系列データであり、系に存在する総粒子数は 1,115 で、各原子とその数、半径の対応は表 1 の通りである。半径は相対的なものであり、また、各原子はそれぞれの原子を区別するために化学分野の慣例に倣って付した色によって描画している。時系列アニメーションの総ステップ数は、801 ステップである。

表 1: 各原子と数、半径の対応関係

原子	O	SI	AL	MG	H	HE
粒子数	409	50	6	50	500	100
半径	1.30	1.00	0.53	0.71	0.80	0.70

システムの実装には OpenGL を用い、C 言語により実装した。なお、使用したハードウェアは SGI 社製の O2 システム (CPU : R10000, Clock : 195 MHz, RAM : 256 Mbytes) である。

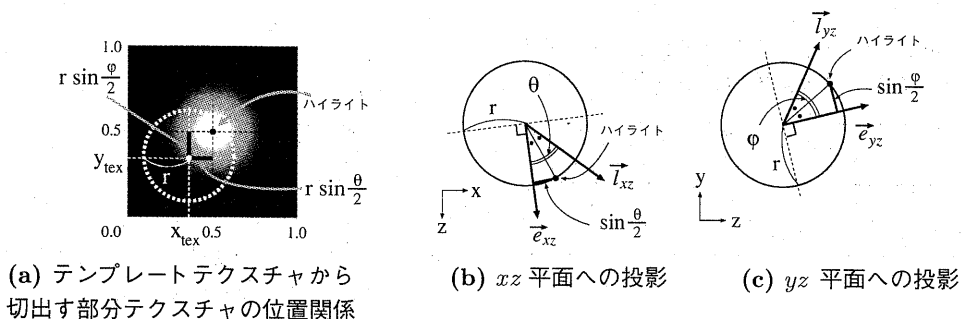


図 4: テクスチャ座標の算出

4.2 実験と結果の考察

時系列アニメーションの結果を図 5 に、視点の移動に伴って球の陰影が変化の様子を図 6 に示す。本手法による描画 (図 6(a)) では、一定の奥行き感が得られており、ポリゴンで近似した球の描画 (図 6(b)) と比較しても、陰影に関して定性的な一致を見ることができる。

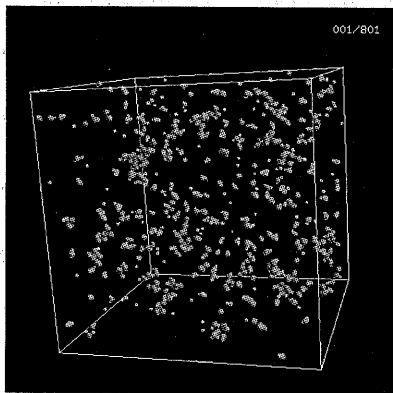


図 5: 分子動力学計算結果の時系列データのアニメーションからのスナップショット

ここで、本論文で実装した手法による球群の描画の高速性を評価するために、ポリゴンで近似した球により球群を描画した場合との比較実験を行った。実験は、時系列データの複数ステップをアニメーションで表示する場合と、あるステップで固定したときに、視点の位置を移動させて系の内部をウォー

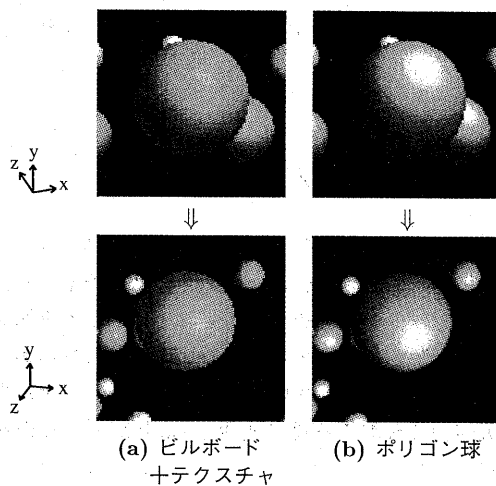


図 6: 球の陰影の変化の比較

クスルーする場合の 2 通りについて、1 秒あたりに描画するフレーム数について比較した (表 2)。時間測定の際に用いた画像の解像度は、 500×500 ピクセルである。双方の場合で、本手法の方が 10 倍程度高速なレンダリング結果を得ることができた。複数ステップのアニメーションの場合には、視点が固定していて球の陰影が変化しないため、テクスチャ座標は一定の値を用いている。しかし、系の内部へのウォークスルーの場合には、3.2 項に示したテクスチャ座標値を求める計算式に基づいて、視点移動するたびにテクスチャ座標を再計算している。複数ステップのアニメーションの場合に比

表2: ビルボード + テクスチャマッピングによる描画とポリゴンによる描画の比較 (単位: fps)

	複数ステップ アニメーション	系の内部への ウォークスルー
ビルボード	4.08	3.07
ポリゴン球	0.41	0.42

べて、ウォークスルーの場合に、より多くの描画時間がかかっているのは、それぞれの粒子に対して随時テクスチャ座標値を求めているために、ディスプレイリストを使用できないことが主な原因として考えられる。

5 まとめと今後の課題

本論文では、ビルボードの円盤をモデリングし、予め格納しておいたテンプレートテクスチャテーブルから部分テクスチャ切出すことによって適切な球の陰影を表すテクスチャを決定し、それを円盤にマッピングする手法を示した。そして、この手法を大規模な球群の描画に適用し、より高速な描画を実現した。

今後の課題としては、まず、描画のさらなる高速化が重要である。また、アニメーション表示の際に重要な、均一なフレームレートを保つために時間管理を図ることなども課題として挙げられる。さらに、より球体の陰影に近い部分テクスチャを切出すためには、テクスチャテンプレートそのものの生成やそこからの切出し方をさらに工夫することが必要である。より発展的な課題として、ディスプレイの大きい時系列データにモーションブラー効果を適用し、各粒子の軌跡を残して粒子の移動の様子をより分かりやすく可視化することや、球以外のオブジェクトの表現を可能にすることなどが考えられる。

なお、分子動力学解析のための可視化システムに限った場合には、以下に挙げるような、解析に有用なさまざまなユーザインターフェース機能を提供

したいと考えている。

- 原子の描画色を対話的に変更 (半透明表示を含む)
- 結合している原子間を線分で結ぶことにより結合関係を可視化
- マジックレンズの効果によって選択した領域を拡大してアニメーション表示
- ビデオレコーダのメタファをもつ操作パネルの設計と Motif による実装。

参考文献

- [1] P. E. Debevec, C. J. Taylor, and J. Malik, "Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-Based Approach," *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 11-20, August 1996.
- [2] I. Fujishiro, R. Tanaka and T. Maruyama, "Human Behavior-Oriented Adaptive Texture Mapping: a Time Critical Approach for Image-Based Virtual Showroom," In *Proc. IEEE VRAIS'97*, March 1997, pp. 4-11.
- [3] Y. Horry, K. Anjyo, and K. Arai: "Tour Into the Picture: Using a Spidery Mesh Interface to Make Animation from a Single Image," *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 225-232, August 1997.
- [4] W. T. Reeves: "Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects" *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, vol. 17, no. 3, pp. 359-376, July 1983.
- [5] W. T. Reeves, R. Blau: "Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Redering Structured Particle Systems," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, vol. 19, no. 3, pp. 313-322, July 1985.
- [6] J. J. van Wijk: "Spot Noise - Texture Synthetic for Data Visualization," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, vol. 25, no. 4, pp. 309-318, July 1991.
- [7] J. J. van Wijk: "Flow Visualization with Surface Particles," *IEEE Computer Graphics & Applications*, vol. 13, no. 4, pp. 18-24, July 1993.
- [8] 岡田勲, 大澤映二 (編), 分子シミュレーション入門, 海文堂, 1989