

Detecção de Colisões Entre Sistemas de Partículas e Objetos Sólidos Através de Grades Pentadimensionais

MAURO STEIGLEDER^{1,2}
ANATÓLIO LASCHUK²

¹UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 950 - São Leopoldo, RS, Brasil
mauro@acm.org

²UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - CPGCC
Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre, RS, Brasil
laschuk@inf.ufrgs.br

Abstract. This paper presents a method to accelerate the collision detection between particle systems and objects of a scene through the use of a five-dimensional grid. The method is based on the fact that the future trajectory of a particle can be represented using only five parameters, ignoring the particle's speed. Some results of the speed up and the advantages obtained through the use of this method are shown.

Keywords: Particle Systems, Acceleration Techniques.

1 Introdução

Um dos aspectos principais para a obtenção de realismo em uma imagem ou animação é a modelagem dos objetos da cena. Tendo este fato em mente, a obtenção do realismo mostra-se bastante difícil quando se pretende, através de técnicas tradicionais de modelagem, definir objetos cujas formas não são bem definidas, como por exemplo, fogo, fumaça, nuvens, explosões, etc. Partindo deste princípio, *Reeves* [6] introduziu o uso de sistemas de partículas como uma técnica para a modelagem de objetos sem forma definida.

Um sistema de partículas pode ser visto como um conjunto de partículas que evoluem ao longo do tempo, onde o processo de evolução de uma partícula representa não somente o seu deslocamento, mas a mudança de seus atributos, como cor, velocidade, tamanho, etc. Os procedimentos envolvidos na animação de um sistema de partículas são bastante simples. Basicamente, a cada instante de tempo, novas partículas são geradas, os atributos das partículas antigas são alterados, ou estas partículas podem ser extintas de acordo com certas regras pré-definidas.

Como as partículas de um sistema são entidades dinâmicas, os sistemas de partículas são especialmente adequados para o uso em animações. Ainda, dentre as principais vantagens dos sistemas de partículas quando comparados com as técnicas tradicionais de modelagem, podem-se citar a facilidade da obtenção de efeitos sobre

as partículas (como borrão de movimento), necessitarem de poucos dados para a modelagem do objeto, serem controlados por processos estocásticos, possuírem um nível de detalhamento ajustável e possuírem um grande controle sobre as suas deformações.

Apesar do crescente desenvolvimento de técnicas para a modelagem de fenômenos naturais através do uso de sistemas de partículas [6] [5] [3] [4] [7] [9] [10] [12], poucos trabalhos têm sido realizados para aperfeiçoar a própria técnica de modelagem através de sistemas de partículas [2] [11]. Este artigo apresenta uma técnica para a aceleração do processo de detecção de colisões entre um sistema de partículas e os demais objetos da cena. O método se baseia no uso de uma grade pentadimensional, obtida a partir da discretização do movimento das partículas do sistema. Cada célula desta grade pentadimensional contém uma lista das partículas que irão se deslocar na direção especificada por esta célula, como será visto a seguir.

O restante do texto apresenta o método para a detecção de colisões, descrevendo o processo para a discretização do movimento das partículas, a forma de obtenção do cone de direção das partículas e o processo para a obtenção das partículas candidatas à intersecção. Também são apresentadas as principais características e propriedades do algoritmo, assim como os resultados obtidos.

2 Método para Detecção de Colisões

Considerando-se a obtenção de um determinado quadro da animação, é simples observar que o tempo de processamento para o tratamento de colisões é proporcional ao número de objetos multiplicado pelo número de partículas. Ainda, considerando-se que o número de partículas pode estar na faixa de centenas de milhares de partículas, com apenas uma dezena de objetos na cena, o número de cálculos de intersecção fica na faixa de milhões de intersecções entre um sistema de partículas e os objetos, por quadro da animação. Isto é relativamente custoso, especialmente se a animação apresentar um número expressivo de quadros.

Uma boa maneira de se acelerar este processo é reduzir o número de partículas que devem ser consideradas no cálculo de intersecção entre o sistema de partículas e os objetos sólidos. O método proposto neste trabalho utiliza uma grade pentadimensional de modo a efetuar uma seleção prévia das partículas que possuem alguma possibilidade de interceptar algum objeto da cena.

O método é baseado na observação que, na maior parte de uma animação com sistemas de partículas, as partículas não estão colidindo com os objetos da cena. Também, na maioria dos objetos modelados com sistemas de partículas, as partículas se movem em uma mesma direção base, com algumas perturbações na direção. Algumas exceções são os fogos de artifício e explosões em geral. Porém, sistemas de partículas são comumente utilizados para a modelagem de fenômenos naturais como fogo, fumaça, neblina, entre outros, sendo que nestas situações as premissas apresentadas são verdadeiras.

Basicamente, o método utiliza uma grade pentadimensional para acelerar a detecção de intersecção de um raio, definido pelo movimento de uma partícula, e os demais objetos da cena. O uso de grades pentadimensionais como uma técnica de aceleração foi inicialmente introduzido por *Arvo e Kirk* [1]. Estes autores utilizaram grades pentadimensionais em um sistema de *ray tracing* para efetuar a aceleração do processo de cálculo de intersecção entre os raios emitidos e os demais objetos da cena. No método apresentado neste artigo, porém, tal metodologia é especialmente adaptada para o uso em animações de sistemas de partículas onde é necessária a detecção de colisões entre as partículas e objetos da cena.

O método para a detecção de colisões entre um sistema de partícula e os demais objetos da cena pode ser resumido em cinco passos elementares:

1. Obter o cone de direções das partículas de uma determinada célula a partir do centro da célula, da direção base das partículas e da variação das direções das partículas;
2. A partir do cone de direções das partículas, obter os diversos raios de amostragem;
3. Computar a intersecção entre os raios amostrados e cada objeto da cena e obter a menor intersecção entre os raios e o objeto;
4. Verificar a possibilidade real de colisão entre alguma partícula e os objetos da cena, comparando-se a distância mínima entre as partículas e o objeto com o módulo do vetor velocidade de cada partícula;
5. Caso exista a possibilidade real de colisão, a intersecção da partícula com o objeto deve ser calculada analiticamente.

2.1 Discretização do Movimento das Partículas

Os princípios em que se apoia o método são bastante simples de serem entendidos. Inicialmente, deve-se considerar que a direção do movimento de uma partícula possui dois graus de liberdade e a posição desta partícula possui três graus de liberdade. Deste modo, a trajetória futura de uma partícula em movimento retilíneo, possui somente cinco graus de liberdade. Também, pode-se verificar que, através do uso de coordenadas esféricas, é possível decompor a velocidade vetorial da partícula, na sua direção de movimento e velocidade escalar. Esta é uma propriedade bastante útil, como será visto a seguir.

A partir da direção base do movimento de um grupo de partículas é definida uma grade pentadimensional, que pode ser expressa como uma tabela com cinco valores independentes.

2.2 Obtenção do Cone de Direção das Partículas

A próxima etapa que deve ser analisada considera como é realizada a detecção de colisão da partícula em movimento com um objeto a partir da grade pentadimensional. O procedimento baseia-se na obtenção de uma primitiva geométrica a partir dos valores independentes de uma determinada entrada da grade pentadimensional. No caso da implementação realizada, um cone é definido com base nos cinco

parâmetros, onde os três parâmetros que definem a posição tridimensional do centro da célula são utilizados para obtenção do vértice do cone, e os dois parâmetros que definem a direção do movimento da partícula são utilizados para se obter o eixo de direção do cone. Como nesta tabela com cinco parâmetros trabalha-se com intervalos, os intervalos dos dois parâmetros que definem a direção são utilizados para definir os ângulos de abertura do cone, obtendo-se desta forma uma primitiva geométrica completa. A obtenção desta primitiva pode ser vista na figura 1.

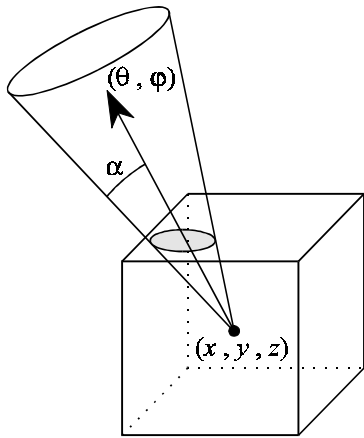


Figura 1. Obtenção do cone que define o conjunto de movimentos das partículas de uma célula da grade pentadimensional.

Apesar da primitiva geométrica utilizada ter sido o cone, outras primitivas são passíveis de utilização, como por exemplo, pirâmides com base retangular. Porém, no caso de ser utilizada tal primitiva, deve-se atentar para o ângulo de rotação da primitiva em torno do eixo.

Um problema que surge, quando do uso da posição central da célula como vértice do cone, é que algumas partículas podem estar fora do cone e, portanto, podem ser obtidos resultados errôneos. Este problema é solucionado movimentando-se o cone na direção oposta à do movimento base das partículas (eixo do cone) de modo que o cone encapsule a célula que define o intervalo das posições tridimensionais. Este processo pode ser visto na figura 2.

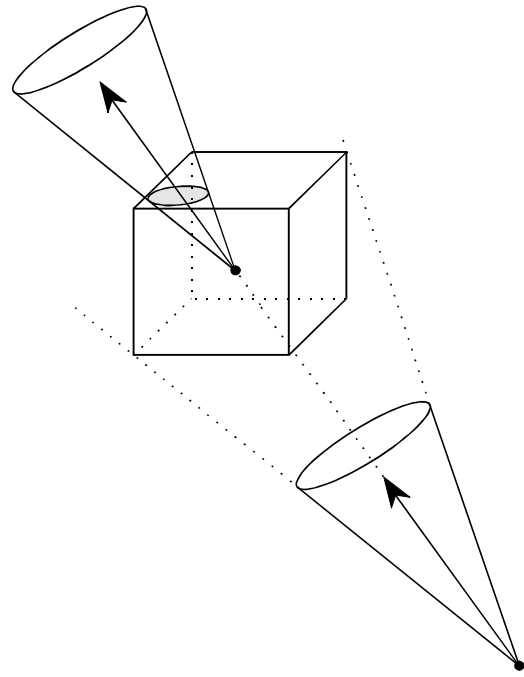


Figura 2. Obtenção do cone que encapsula o ortoedro que define as posições.

2.3 Obtenção das Partículas Candidatas à Intersecção

Uma vez obtido o cone que define o conjunto de movimentos das partículas de uma célula, deve-se determinar se este cone possui pontos de intersecção com os demais objetos da cena. O procedimento de intersecção entre um cone e um objeto genérico é demasiadamente custoso e particularmente de difícil computação, implicando um cálculo específico para cada primitiva. Também, é necessário obter a distância mínima do objeto ao centro da célula, cálculo também bastante custoso computacionalmente.

Este problema é solucionado através da utilização de procedimentos aproximativos. O método efetua uma amostragem de raios emitidos a partir do vértice da célula e com direções dentro do cone que define o conjunto de direções das partículas. Uma vez gerados estes raios, calculam-se as intersecções deles com os objetos da cena. Caso algum raio intercepte o objeto, significa que existe pelo menos uma área de colisão entre o objeto e o cone de direções das partículas. Para determinar a distância mínima utiliza-se o mesmo processo, selecionando-se a menor das distâncias de

intersecção entre os raios e o objeto. Deste modo, obtém-se uma distância mínima aproximada entre o objeto e o cone de direções das partículas. Tal processo é mostrado na figura 3.

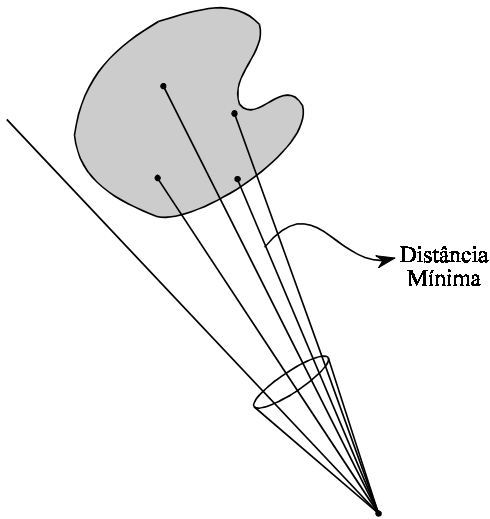


Figura 3. Processo de amostragem do cone de direções das partículas.

O processo de utilizar uma amostragem de raios ao invés de uma abordagem analítica apresenta vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, encontra-se a possibilidade de utilização do mesmo algoritmo para os diversos objetos sólidos, mesmo objetos CSG. Outra vantagem é que esta abordagem apresenta um custo computacional menor que uma abordagem analítica, exceto se forem utilizados um grande número de raios para a amostragem. A principal desvantagem da utilização de um processo por amostragem é que ele obtém somente uma aproximação do valor ou situação real. O fato da distância mínima ser somente uma aproximação pode ser parcialmente compensado através do uso de um fator de erro. Como esta distância mínima irá ser utilizada para uma determinação de proximidade, este fator de erro simplesmente irá diminuir a distância mínima para um valor mais confiável.

Finalmente, se o cone de direções das partículas interceptou com sucesso o objeto sólido da cena, deve-se verificar se as partículas apresentam alguma possibilidade real de intersecção com o objeto. Para realizar esta verificação compara-se a distância mínima das partículas ao objeto com a distância do movimento de cada partícula (já que a direção do movimento das

partículas encontra-se em coordenadas esféricas), determinando-se a possibilidade de intersecção entre cada partícula e os objetos da cena. Assim sendo, se a distância que a partícula percorrerá (definida pelo módulo do vetor velocidade da partícula) é maior que a distância mínima da partícula ao objeto (considerando-se que o cone de direções das partículas intercepta o objeto) existe uma grande possibilidade que a partícula colida com o objeto em questão. Neste caso, é necessário então calcular a intersecção entre o raio definido pela posição e direção da partícula e o objeto, efetuando a reflexão apropriada se necessário.

2.4 Características do Algoritmo

Através da análise dos passos descritos nas seções anteriores, pode-se verificar que somente são calculadas as intersecções entre as partículas e os demais objetos da cena quando a partícula for potencialmente candidata a uma intersecção. Também, o método é suficientemente genérico, de modo que pode ser facilmente incorporado em diversas simulações de fenômenos naturais que exigem tratamento especial para a animação dos sistemas de partículas.

Uma desvantagem aparente é a necessidade de conversão de coordenadas cartesianas para coordenadas esféricas e vice-versa. Porém, frequentemente, a equação do movimento das partículas inclui uma perturbação aleatória que é realizada sobre o vetor velocidade das partículas à medida que estas são movimentadas deve ser feita sobre os ângulos de direção do movimento da partícula. A perturbação é realizada sobre os ângulos de direção do movimento porque se for realizada em coordenadas cartesianas podem ocorrer fenômenos errôneos.

Um destes fenômenos errôneos é a mudança total da direção da partícula ao invés de uma simples perturbação. Por exemplo, especificando-se que a perturbação das partículas de um sistema é de $\pm 0,5$ nas coordenadas X, Y e Z, no caso das componentes do vetor velocidade serem maiores que 0,5, a direção do movimento sofrerá somente uma perturbação. Porém se uma das componentes for menor que 0,5, a direção do movimento sofrerá uma grande perturbação, apesar dos valores pequenos que estão sendo utilizados. Através do uso de coordenadas esféricas, por sua vez, este problema não ocorre, uma vez que a perturbação é realizada diretamente sobre a direção do movimento.

Outra razão para a utilização de perturbações sobre os ângulos de direção das partículas é que, segundo as

equações apresentadas por *Shinya e Fournier* [8], os efeitos de forças externas como forças eólicas, podem ser melhor modelados através de perturbações nos ângulos das direções utilizando equações diferenciais.

A maior desvantagem deste método é que o processo de detecção de colisões entre partículas e objetos sólidos da cena é realizado de forma aproximativa, porém suficiente para a maioria dos casos. Outra desvantagem é a quantidade de memória exigida para a alocação da grade pentadimensional.

3 Resultados Obtidos

Para avaliar a validade do método para aceleração do processo de detecção de colisões entre sistemas de partículas e demais objetos sólidos da cena foi realizada uma animação simples de um sistema de partículas, comparando-se os tempos de processamento com e sem a utilização de uma grade pentadimensional. A cena na qual o sistema de partículas evolui é composta de uma esfera e de um plano, onde o sistema de partículas se comporta como uma nuvem de fumaça subindo e eventualmente colidindo com a esfera, como mostra a figura 5.

Os testes foram realizados em um computador Pentium 166Mhz, com 16Mb de memória RAM. A resolução da grade pentadimensional utilizada foi de 16x16x16 para a representação da posição e de 32x16 para a representação da direção do movimento.

Os tempos de processamento com e sem a utilização da grade pentadimensional, assim como o número total de partículas, o número de partículas realmente testadas e o número de colisões ocorridas são apresentados na tabela 1.

Pode-se constatar que o tempo de processamento com o uso da grade pentadimensional é pouco dependente do número total de partículas do sistema, sendo muito mais dependente do número de partículas testadas. Pode-se observar que, comparativamente com o tempo de processamento sem o uso da grade pentadimensional, o tempo de processamento é significativamente menor à medida que a quantidade de partículas aumenta. Isto é devido ao fato que o tempo de processamento sem o uso de grades pentadimensionais é mais dependente da quantidade total de partículas no sistema.

A figura 4 mostra o gráfico comparativo dos tempos de processamento. A partir deste gráfico pode-se observar que ambos os tempos de processamento são lineares. Porém, como o tempo de processamento com o

uso da grade pentadimensional é mais dependente do número de partículas testadas do que do número total de partículas, a inclinação da reta é menor, comparativamente com a reta produzida pelo tempo de processamento sem o uso da grade pentadimensional.

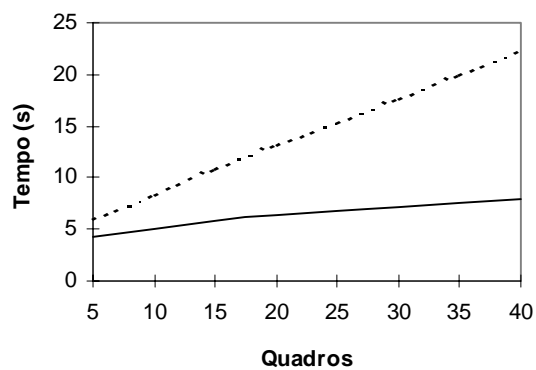


Figura 4. Gráfico comparativo dos tempos de processamento com e sem a utilização da grade pentadimensional.

Tendo em vista tais resultados do uso da grade pentadimensional, alguns aspectos devem ser destacados:

1. O tempo de processamento é alterado quando as partículas, num número significativo, devem ser testadas. A varredura de todas as células da grade não apresenta um impacto significativo sobre o tempo de processamento;
2. As partículas somente são testadas se estiverem significativamente próximas a algum objeto da cena e em direção de colisão com ele. Caso as partículas estejam distantes ou em direção de movimento oposta ao objeto, o tempo de detecção de colisão não possui impacto significativo sobre o tempo de processamento;
3. O método apresenta uma diminuição significativa do tempo de processamento, além de ser pouco dependente do número de partículas no sistema, sendo mais dependente do número de partículas potencialmente próximas aos objetos da cena.

Deve-se observar que o fator de aceleração é dependente da geometria da cena e do tipo de sistema de partículas que se está modelando.

Quadros	Número Total de Partículas	Número de Partículas Testadas	Número de Colisões Ocorridas	Tempo com Aceleração 5-D (segundos)	Tempo sem Aceleração 5-D (segundos)
5	24.971	0	0	4,3	6,1
10	49.949	539	1.146	5,0	8,4
15	74.942	7.597	4.317	5,9	10,9
20	100.224	7.546	4.329	6,4	13,2
25	125.395	7.655	4.346	6,8	15,4
30	150.618	7.945	4.429	7,2	17,7
35	175.605	7.977	4.411	7,6	20,0
40	200.728	8.292	4.529	8,0	22,2

Tabela 1. Tabela com dados e tempos de processamento obtidos.

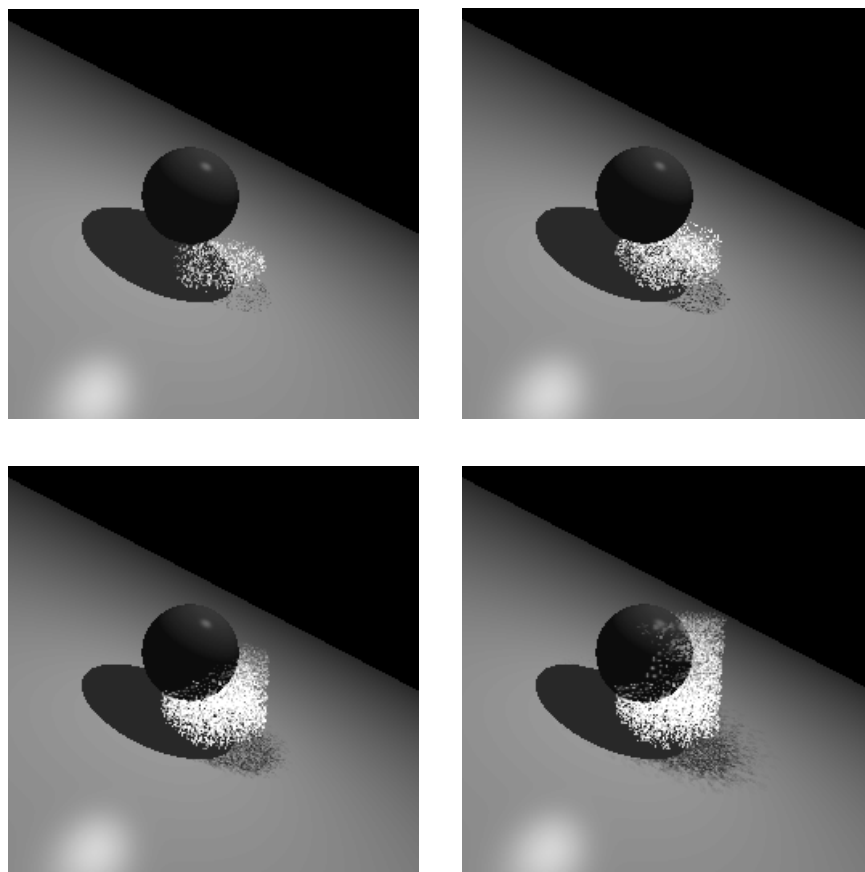


Figura 5. Quadros de uma animação simples envolvendo uma esfera, um plano e um sistema de partículas.

4 Conclusões e Extensões

Este trabalho apresenta um método para acelerar o processo de detecção de colisões entre um sistema de partículas e os demais objetos sólidos da cena.

O método para a aceleração da detecção de colisão entre sistemas de partículas e os demais objetos sólidos da cena utilizando a grade pentadimensional, quando comparado com o método tradicional de cálculo de colisões, apresenta as seguintes propriedades:

1. Uma aceleração significativa no processo de detecção de colisões entre o sistema de partículas e os objetos da cena, uma vez que relativamente poucas partículas são testadas contra os objetos da cena;
2. Considerando-se que o método baseia-se na detecção da proximidade e direcionamento das partículas com relação ao objeto, a grade pentadimensional apresenta uma boa aplicabilidade. Este uso favorável é devido ao fato que ela discretiza tanto a posição quanto a direção das partículas para comparação da distância;
3. O tempo de processamento para a detecção das colisões entre as partículas e os objetos é dependente principalmente do número de partículas potencialmente próximas aos objetos, ao invés do número total de partículas do sistema. Este fato é de grande importância, uma vez que a detecção das partículas potencialmente próximas é realizada apenas com consultas a tabelas e com comparações simples, não envolvendo cálculos complicados ou custosos computacionalmente. O único processo computacionalmente custoso é a conversão de coordenadas cartesianas para coordenadas esféricas, porém este processo deve ser realizado independentemente, para o processo de perturbação do vetor velocidade das partículas, sendo seus resultados reutilizados sem custo no algoritmo de detecção de colisão.

Existem ainda alguns problemas que devem ser solucionados, assim como extensões que podem ser realizadas no método proposto. Dentre elas, pode-se citar o aumento da aplicabilidade do método e o processo de detecção de colisões entre dois ou mais sistemas de partículas, assim como entre partículas do mesmo sistema.

A aplicabilidade poderia ser aumentada se fossem utilizados outros procedimentos para a obtenção da direção das partículas, de modo que o método pudesse ser empregado em outros tipos de animação e não somente com sistemas de partículas. Está sendo estudado o uso de árvores BSP (*binary space partitioning trees*) pentadimensionais, porém o estudo encontra-se apenas em fase inicial.

Também está sendo estudado um método para o tratamento de colisões entre dois ou mais sistemas de partículas ou entre partículas de um mesmo sistema. Tal procedimento pode ser realizado através da utilização da densidade de partículas em uma determinada célula tridimensional.

No que tange às aplicações potenciais do método para detecção de colisões entre partículas e objetos sólidos utilizando-se grades pentadimensionais, além da síntese realística de fenômenos naturais, pode-se citar os processos de visualização científica de fluidos. Considerando-se que o processo de visualização da trajetória de fluidos em um ambiente pode ser realizado através do uso de partículas e que tais procedimentos envolvem uma quantidade considerável de partículas, o uso de grades pentadimensionais pode acelerar consideravelmente tal processo de visualização.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos colegas Christian Hofsetz, pelas valiosas discussões sobre o método de aceleração, Franz Figueroa, pelas grandes sugestões dadas, e à professora Carla Freitas pelas críticas a este texto.

Os autores também gostariam de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro à pesquisa realizada.

Referências

- [1] Arvo, J. e Kirk, D., *Fast Ray Tracing by Ray Classification*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH '87. v.21, n.4, jul. 1987. p. 55-64.
- [2] Ebert, D. S., Carlson, W. E. e Parent, R. E., *Solid Spaces and Inverse Particle Systems for Controlling the Animation of Gases and Fluids*. Springer-Verlag, The Visual Computer. n.10, 1994. p. 179-90.
- [3] Loke, T.-S. et al., *Rendering Fireworks Displays*. IEEE Computer Graphics and applications, v.12, n.3, mai. 1992. p. 33-43.

- [4] Nagasawa, M. e Kuwahara, K., *Smoothed Particle Rendering for Fluid Visualization in Astrophysics*. Scientific Visualization of Physical Phenomena. Springer-Verlag. 1994. p. 589-605.
- [5] Reeves, W. T. e Blau, R., *Approximative and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH '85. v.19, n.3, jul. 1985. p. 313-22.
- [6] Reeves, W. T., *Particle Systems: A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH '83. v.17, n.3, jul. 1983. p. 359-76.
- [7] Reynolds, C. W., *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH '87, v.21, n.4, jul. 1987. p. 25-34.
- [8] Shinya, M. e Fournier, A., *Stochastic Motion: Motion Under the Influence of Wind*. Eurographics Association, Proceedings of EUROGRAPHICS '92. v.11, n.3, 1992. p. 119-28.
- [9] Sims, K., *Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH '90. v.24, n.4, ago. 1990. p. 405-13.
- [10] Szeliski, R. e Tonnesen, D., *Surface Modeling with Oriented Particle Systems*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH'92. v.26, n.4, jul. 1992. p. 185-94.
- [11] Takai, Y., Ecchu, K. e Takai, N. K., *A Cellular Automaton Model of Particle Motions and Its Applications*. Springer-Verlag, The Visual Computer. n.11, 1995. p. 240-52.
- [12] Witkin, A. P. e Heckbert, P. S., *Using Particles to Sample and Control Implicit Surfaces*. ACM Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH'94. v.28, n.4, jul. 1994. p. 269-78.