

Modelo para Simulação de Superfícies Deformáveis Baseada na Análise Dinâmica

LUCIANA PORCHER NEDEL
CARLA MARIA DAL SASSO FREITAS
FLÁVIO RECH WAGNER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Instituto de Informática - II
Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação - CPGCC
Caixa Postal 15064 - CEP 91501-970
Porto Alegre, RS, Brasil
lpn@inf.ufrgs.br
carla@inf.ufrgs.br
flavio@inf.ufrgs.br

Abstract. This paper describes a model for the simulation of flexible objects in 3D space. A rectangular mesh is used as the geometric model; each point in the mesh is considered as a particle, when applying the physical model. The physical model is based on direct dynamics and uses Hooke springs, for simulating elasticity, curvature and torsion. The model also considers external forces, collision with objects, and user-defined constraints.

1 Introdução

Os modelos baseados em leis físicas são obtidos através da simulação da evolução de sistemas físicos. O uso de princípios fundamentais da física permite que a animação apresente resultados coerentes com o comportamento dos objetos reais e que seja utilizada para simulação de fenômenos naturais. Corpos articulados e objetos flexíveis podem ser modelados e simulados graças ao uso de atores e à interação entre cinemática, dinâmica e controle procedural. Movimentos realísticos destes objetos e simulação de fenômenos naturais podem ser obtidos através:

- da modelagem de objetos levando em consideração algumas de suas características físicas (massa, centro de massa, momento de inércia, etc);
- da geração de seus movimentos através da aplicação de forças e torques sobre os objetos;
- do controle através do uso de restrições e condições iniciais e
- da utilização de procedimentos numéricos que calculem valores para as variáveis que estão sendo simuladas.

Os estudos a respeito de modelos baseados em leis físicas vêm fornecendo uma aproximação inicial para a resolução de um problema genérico. Trata-se da simulação de diversos tipos de objetos, seus movimentos e materiais,

bem como o controle da reação entre estes objetos e destes com o ambiente, tanto no espaço como no tempo. É preciso ressaltar ainda que os modelos baseados em física não pretendem reproduzir a realidade e sim produzir movimentos com base nos mesmos princípios utilizados na natureza.

Neste artigo é apresentado um modelo baseado em leis físicas para representação de superfícies flexíveis. As superfícies são modeladas como sistemas de partículas, onde o comportamento de cada partícula é definido através do relacionamento das mesmas, tanto com suas vizinhas como com o ambiente no qual estão inseridas. Para calcular o movimento das partículas utilizou-se um método baseado em forças, onde pode-se salientar a criação do conceito de "molas angulares" no cálculo do coeficiente de curvatura e torção de uma superfície. Resultados iniciais foram apresentados em [NED 92], onde não são, entretanto, aplicados muitos dos conceitos aqui apresentados.

O texto está organizado de maneira a apresentar, primeiramente, uma rápida revisão bibliográfica sobre modelos deformáveis. Em seguida, o modelo desenvolvido é descrito e a geração do movimento das superfícies definidas é detalhado. São apresentados os resultados práticos obtidos.

2 Modelos Deformáveis

Atualmente, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de modelar objetos não-rígidos, ou seja, objetos que possuam características elásticas. Dentre estes estudos, tem-se pesquisado tanto modelos geométricos cujo

movimento é controlado através da cinemática, como modelos regidos por outros atributos físicos, como massa e força, com movimento controlado pela dinâmica. É preciso salientar ainda o uso de restrições na modelagem dos objetos deformáveis.

Barr introduziu a modelagem geométrica de deformações em objetos sólidos através da manipulação de operadores sobre dados abstratos [BAR 84]. Sederberg e Parry [SED 86] introduziram o conceito da deformação em formas-livres (*Free-Form Deformation - FFD*), a qual permite esculpir modelos sólidos [CHA 89].

A técnica conhecida como deformação animada em formas-livres (*Animated Free-Form Deformation - AFFD*), desenvolvida por Coquillart e Jancène, foi concebida a partir da FFD [COQ 91]. É apresentada uma ferramenta de deformação composta por duas grades 3D: a inicial e a final, esta última interativamente deformada pelo usuário. Quando o objeto é inserido na grade final, ele se deforma de acordo com a mesma. A animação de um objeto 3D se dá através da associação do mesmo com a ferramenta acima descrita [BEC 92].

O primeiro modelo de objetos deformáveis baseado em física foi desenvolvido objetivando uma simulação estática (sem animação) da realidade. Weil [WEI 86] propõe a modelagem de roupas, através da interpolação de superfícies entre curvas catenárias, a fim de simular roupas penduradas por pontos.

Barr, Terzopoulos, Platt e Fleischer [PLA 88] usaram componentes moleculares discretos, para modelar o comportamento elástico dos objetos. Terzopoulos e Fleischer ainda estenderam seu modelo, para incluir componentes flexíveis e rígidos [TER 88] e para permitir a simulação de comportamento inelástico [TER 88a].

Outros autores têm abordado a deformação de objetos através da física. Dentre os modelos desenvolvidos, pode-se salientar os métodos baseados em restrições, apresentados primeiramente por Platt e Barr [PLA 88a], e mais recentemente por Metaxas e Terzopoulos [MET 92]. A simulação de tecidos foi abordada ainda por Dias e Rebordão [DIA 91] onde é apresentado um modelo energético para simulação estática e por Carignan, Yang, Magnenat-Thalmann e Thalmann [CAI 92], com o desenvolvimento de um modelo dinâmico para simular tecidos complexos.

3 Modelo de Representação de Superfícies Flexíveis

No que diz respeito ao método desenvolvido para representar superfícies deformáveis tanto na sua forma estática como em movimento, utilizou-se um modelo contínuo. Para representar graficamente este modelo é necessária a discretização do mesmo tanto no aspecto espacial como temporal. Nas seções a seguir, é apresentado o modelo discreto de representação utilizado a fim de

permitir a simulação geométrica e física de uma superfície deformável.

3.1 Modelo Geométrico

A discretização da superfície deformável no espaço dá-se no sentido de que é necessário que a mesma seja graficamente representável. Para tanto, parte-se do princípio que a superfície é definida através de um conjunto de pontos no espaço euclidiano.

Como o objetivo deste trabalho não reside na apresentação de modelos geometricamente complexos, optou-se por restringir a forma das superfícies deformáveis a retângulos. Portanto, o modelo geométrico considerado consiste de uma malha retangular representada por uma matriz de pontos M , de dimensões $n \times m$. Cada elemento $M_{i,j}$ desta matriz, contém um terno (x,y,z) de coordenadas, que correspondem a um ponto da superfície no espaço 3D. Considera-se ainda r como sendo a distância horizontal e vertical entre os elementos da matriz M (conforme figura 1).

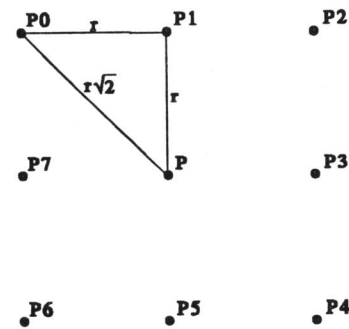


Figura 1: Modelo geométrico de uma malha deformável.

3.2 Modelo Físico

De modo a simular fisicamente uma malha flexível utilizaram-se as leis da mecânica de partículas uma vez que, segundo [RES 84], o movimento de uma partícula é determinado pela natureza e pela disposição de outros corpos, que constituem sua vizinhança. Neste caso específico, considera-se que uma superfície deformável é formada por partículas com densidade de massa m , cujo comportamento é definido através da sua interação com o universo e com as demais partículas que formam a superfície. Fazendo a correspondência com o modelo geométrico sugerido, tem-se cada célula da matriz M como uma partícula.

O modelo físico baseia-se fundamentalmente na aplicação de forças sobre os diversos pontos de massa da malha, gerando novas posições para os mesmos. Através da soma de todas as forças aplicadas, obtém-se uma força resultante para cada ponto da superfície deformável.

Com o objetivo de simplificar, considerou-se aqui a aplicação de 7 forças distintas, sendo elas: força da gravidade, força externa, força de elasticidade, força de curvatura e torção, força de colisão, força de restrição e força de atrito. Desta forma, pode-se dizer que a força resultante em cada ponto da malha, em um instante de tempo t pode ser calculada da seguinte forma:

$$F_{\text{RESULT}} = F_{\text{GRAV}} + F_{\text{EXT}} + F_{\text{ELAST}} + F_{\text{CURV}} + F_{\text{COLIS}} + F_{\text{RESTRI}} + F_{\text{ATRITO}}$$

Abaixo, são apresentadas em detalhe as componentes envolvidas no cálculo da força resultante sobre um ponto, além dos detalhes envolvidos na sua definição e cálculo. Cabe ressaltar ainda, que foi utilizada uma representação vetorial para as forças aqui descritas.

3.2.1 Gravidade

A força gravitacional é calculada para cada ponto de massa da superfície, da seguinte forma:

$$F_{\text{GRAV}} = g.m,$$

onde g representa a aceleração da gravidade cujo sentido é sempre constante, e m , a densidade de massa do ponto.

3.2.2 Vetor de Força Externa

Trata-se de um vetor de força aplicado sobre todos os pontos de massa da superfície com o objetivo de simular uma força qualquer existente no ambiente. Este vetor de força é fornecido diretamente ao sistema e foi incluído no modelo a fim de permitir a simulação de forças como a exercida pela pressão do vento, por exemplo.

3.2.3 Elasticidade

Para simular a elasticidade resultante em um ponto $P_{i,j}$ da matriz \mathbf{M} , utilizou-se os conceitos envolvidos na Teoria da Elasticidade, mais precisamente das molas elásticas lineares. Supôs-se a conexão de cada ponto de massa com seus 8 vizinhos, através de molas (figura 2).

Sabendo-se que a força exercida por uma mola linear sobre um ponto de massa é

$$F_{\text{MOLA}} = -km.(P_f - P_r), \quad (1)$$

onde km é a constante que indica o grau de elasticidade da mola, P_f o ponto que representa a sua extremidade fixa e P_r o ponto de repouso da mola. Pode-se, por extensão, definir a força elástica como sendo o somatório das forças exercidas pelas molas, no ponto P (representado na figura 2 como sendo a extremidade comum às 8 molas):

$$F_{\text{ELAST}} = \sum_{i=0}^7 F_{\text{MOLA}_i}$$

Fazendo uma relação das equações acima descritas com o modelo elástico exibido na figura 2, pode-se dizer que:

- considerando a mola que une o ponto P_I ao ponto P , o cálculo da força exercida pela mola sobre o ponto P , dá-se através da aplicação da equação 1. Assim, tem-se o ponto P_f representado por P_I . Quanto ao ponto de repouso da mola (P_r), pode ser calculado da seguinte forma: sabendo-se que a distância vertical e horizontal entre os pontos que compõem a malha flexível é representada pela variável r (que indica a distância de repouso da mola), o ponto P_r pode ser encontrado tomando-se o vetor com origem em P_I , comprimento r e direção e sentido indicados pelo vetor $\overrightarrow{P_I P}$;
- no caso das molas diagonais, a distância de repouso da mola não pode ser indicada pela variável r . Isto pode ser observado através da disposição física dos pontos. Na diagonal de repouso (r_d), $r_d = r\sqrt{2}$ (figura 1).

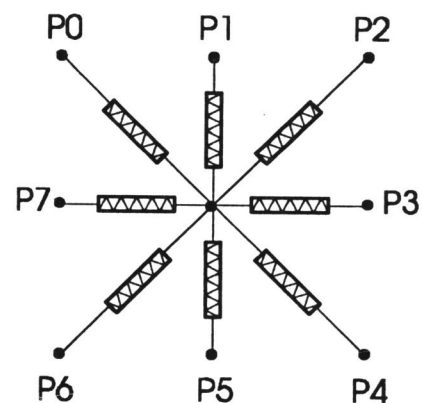


Figura 2: Modelo elástico da superfície.

No que se refere à simulação de materiais reais, pode-se dizer que as suas características elásticas são determinadas através da parametrização das constantes das molas. Por exemplo, para simular uma folha de papel, deve-se utilizar constantes de elasticidade muito grandes para as molas. Já no caso da simulação de um tecido bastante elástico (como lycra), as constantes devem possuir valores muito baixos.

O modelo elástico prevê ainda que as molas podem estar divididas em 3 classes: horizontais, verticais e diagonais. A diferenciação permitida entre elas refere-se às suas constantes de elasticidade. A título de ilustração, pode-se citar como exemplo a simulação de uma folha de papel crepom, que apesar de ter muito pouca elasticidade no sentido vertical, possui grande capacidade de deformação no sentido horizontal.

3.2.4 Curvatura e Torção

Optou-se por chamar de força de curvatura e torção, a força que objetiva determinar o grau com que uma superfície se curva e torce, formando dobras sobre si mesma. Tal qual a força da elasticidade, esta força também é calculada para cada ponto de massa da malha em função da posição dos seus 8 pontos vizinhos.

A simulação física deste efeito foi concebida através da colocação do que se denominou "molas angulares". Estas molas foram colocadas entre os pontos vizinhos de um dado ponto P , da seguinte forma: uma mola no ângulo formado entre os vértices P_0, P e P_4 (conforme pode ser visto na figura 3); uma entre P_1, P e P_5 ; outra entre P_2, P e P_6 e uma última entre P_3, P e P_7 .

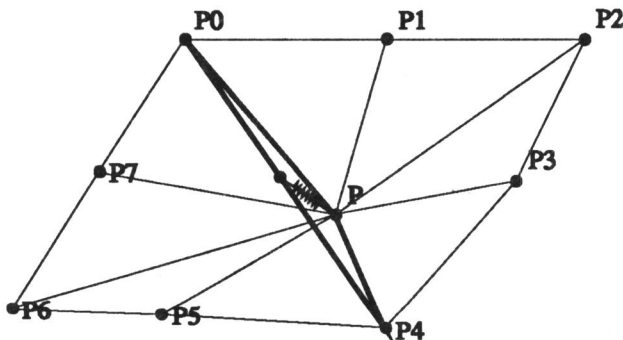


Figura 3: Mola angular entre os pontos P_0, P e P_4 , com ângulo inferior a 180° .

A implementação dessas molas dá-se da seguinte forma (supondo o exemplo da mola no ângulo formado entre P_0, P e P_4):

- são traçados 2 segmentos de reta com origem no ponto P , direção e sentido equivalentes aos vetores $\overrightarrow{PP_0}$ e $\overrightarrow{PP_4}$ e comprimento igual à distância inicial entre os pontos da malha (repouso das molas), definida na seção 3.1 pela variável r ;
- a partir das 2 extremidades dos vetores traçados, traça-se um novo segmento de reta, unindo-as;

- por fim, coloca-se uma mola unindo o ponto P ao ponto médio do novo segmento. Assume-se que esta "mola angular" está em repouso quando a distância entre as suas extremidades é igual a 0 (zero), ou seja, a mola está em repouso quando o ângulo formado pelos pontos P_0, P e P_4 é igual a 180° .

Pode-se concluir então, que a definição das características materiais de uma determinada superfície, no que diz respeito a sua capacidade de se curvar e torcer, é determinada através das constantes de elasticidade das "molas angulares". Portanto, para simular uma superfície com pouca resistência à curvatura como, por exemplo, uma folha de papel grosso, deve-se parametrizar as constantes das molas angulares com um valor bastante alto. Por outro lado, para obter-se uma superfície com grande resistência à curvatura e torção, como na simulação de uma rede de pescador, onde o ângulo formado entre um determinado ponto P e seus vizinhos pode tender a zero, é necessário atribuir valores tendendo a zero para as constantes das molas angulares.

3.2.5 Colisão

Considerando que a descrição dos objetos que compõem o mundo virtual dá-se através de faces (no caso das superfícies deformáveis, admite-se que cada 3 pontos de massa definem um triângulo), a detecção da colisão é executada através de uma função $f(i,j)$ que verifica, para cada vértice da malha, se existe contato com uma face qualquer do universo. Em caso negativo, a força de colisão é nula. Entretanto, uma vez detectada a colisão, procede-se com o seu tratamento.

Neste estudo são consideradas apenas as colisões elásticas, ou seja, aquelas em que há conservação da energia cinética. Para melhor entendimento da metodologia usada para resolver a colisão entre dois corpos, julgou-se adequado fazer uma rápida revisão no capítulo da física que trata a respeito do choque elástico entre partículas, conforme [RES 84].

Considerando-se a colisão entre as partículas de massa m_1 e m_2 , cujas velocidades antes do choque são definidas por v_{1i} e v_{2i} e velocidades após o choque determinadas por v_{1f} e v_{2f} obtém-se:

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_{2i}$$

e

$$v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{1i} + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_{2i}$$

A partir da análise destas 2 equações, conclui-se que:

- quando as partículas em colisão têm a mesma massa, ou seja, $m_1 = m_2$ (caso da colisão de uma superfície consigo mesma), as duas equações anteriores se tornam simples: $v_{1f} = v_{2i}$ e $v_{2f} = v_{1i}$. Isto quer dizer que, em uma colisão elástica entre duas partículas de massa iguais, as partículas simplesmente trocam suas velocidades durante a colisão;
- quando m_2 está em repouso e é muito maior que m_1 (caso previsto para a colisão com sólidos), então $v_{1f} \approx -v_{1i}$ e $v_{2f} \approx 0$. Isto significa que quando uma partícula leve se choca com outra mais pesada, em repouso, a velocidade da partícula leve é praticamente invertida, enquanto que a partícula pesada permanece praticamente em repouso.

Considerando o modelo geométrico definido na seção 3.1, no qual uma malha deformável é representada através de um conjunto de pontos, é preciso admitir uma situação na qual um ponto da malha, na colisão com ela própria, não colide exatamente com outro ponto e sim com uma posição qualquer implícita no modelo.

A fim de contornar esta restrição imposta pelo modelo, foram estudadas 3 diferentes abordagens para a solução deste problema, sendo que nos 3 casos considera-se a malha descrita em termos de triângulos cujos vértices representam pontos de massa. Ao detectar a colisão, opta-se por uma das 3 abordagens sugeridas, a saber:

1. elege-se o vértice do triângulo que está mais próximo do ponto de colisão e assume-se este como sendo o novo ponto de colisão;
2. os 3 vértices do triângulo atingido são considerados como pontos de colisão;
3. conecta-se o ponto de colisão com os vértices do triângulo através de molas em repouso, conforme figura 4. Assim, após este sofrer as consequências da colisão, afetará também diretamente os vértices do triângulo.

3.2.6 Restrições Geométricas

Com o objetivo de facilitar o controle das formas e, principalmente, do movimento de superfícies deformáveis, foram impostas algumas restrições geométricas ao modelo. São elas:

- a existência de pontos imóveis na grade que representa a superfície, isto é, alguns pontos de massa são fixados a coordenadas no espaço euclidiano;
- a determinação de parada de um ponto do objeto em movimento ao atingir determinada posição (x, y, z) ;
- a fixação de pontos do objeto em pontos de outro corpo. Desta forma, pode-se fixar superfícies deformáveis a corpos sólidos e simular, por exemplo, uma pessoa vestida e caminhando;
- o movimento cinemático de pontos. Através desta restrição, pode-se transladar um ponto ou um conjunto deles, fazê-los percorrer um determinado caminho, ou ainda rotacioná-los em torno de uma determinada posição no espaço.

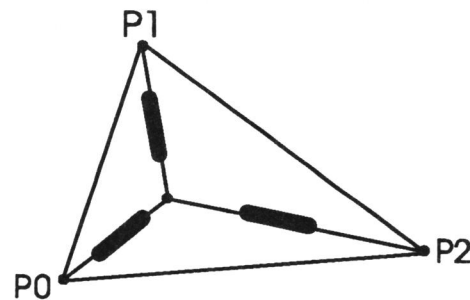


Figura 4: Colisão de uma partícula com um triângulo.

A implementação destas funções é feita através da utilização da dinâmica inversa. No caso de ter sido especificada qualquer restrição sobre um dado ponto, é calculada uma força tal que leve o ponto a obedecer a restrição em questão. Entretanto, a metodologia utilizada para satisfação das restrições permite facilmente a inclusão de novas restrições, sem que isto acarrete modificações no modelo físico existente.

Quanto às restrições atualmente previstas, pode-se dizer que foram concebidas com o objetivo de simular situações em que a superfície mantém-se "pendurada" por um ou mais pontos ou movimenta-se em determinada direção. Esta restrição pode ser usada, por exemplo, na simulação de uma toalha pendurada em um prego; uma cortina se fechando; ou ainda, uma bandeira presa a um mastro e tremulando ao vento.

3.2.7 Atrito

Denominou-se força de atrito, a força responsável pelo retardo de um movimento e que atua sobre a força resultante em cada ponto da superfície deformável.

Para definir a força de atrito, é fornecido ao sistema um coeficiente que indica o percentual da força resultante que é anulado pelo atrito. Quanto a aceleração resultante da força de atrito, pode-se dizer que atua sempre no sentido oposto ao sentido do movimento. A seguir é apresentado o equacionamento desta força.

$$i = \begin{cases} 1 & \text{se } V < 0 \\ -1 & \text{se } V > 0 \end{cases}$$

$$F_{\text{ATRITO}} = i \cdot k_a \cdot F_{\text{RESULT}}$$

onde i indica o sentido da força de atrito, V a velocidade da partícula, F_{ATRITO} o vetor que representa a força de atrito, k_a o coeficiente de atrito e F_{RESULT} o vetor de força resultante em uma partícula.

Neste modelo, assumiu-se como atrito a resistência do ar, e principalmente, a fricção entre as partes das molas.

4 Simulação do Movimento

Conforme apresentado anteriormente, o modelo utilizado para simular uma superfície deformável baseia-se em um sistema de partículas que se relacionam com o meio externo e entre si, através de molas. Portanto, a simulação do movimento de uma superfície dá-se através da aplicação das equações de movimento sobre cada uma das partículas que formam o modelo.

O objeto mais simples a ser considerado pela física é a partícula, que corresponde a um ponto de massa. Considerando uma partícula como um ponto, torna-se óbvio que o único movimento relevante a ser considerado é o translacional, sendo o rotacional ignorado. A posição de uma partícula no universo é indicada pelo vetor x , sua velocidade pelo vetor v e a aceleração pelo vetor a . A densidade de massa de uma partícula é indicada pela variável escalar m e as forças que atuam sobre ela, pelo vetor F_i . Assim, pode-se definir a equação de movimento para uma partícula, como:

$$m \cdot a = m \frac{dv}{dt} = \sum_i F_i$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

As equações de movimento constituem equações diferenciais ordinárias de segunda ordem, podendo,

entretanto, serem descritas como equações diferenciais de primeira ordem.

O método utilizado para integrar numericamente as equações diferenciais ordinárias foi o método de Euler explícito com espaço de tempo h constante. A opção por este método foi feita em vista de sua simplicidade e facilidade de implementação.

Abaixo descreve-se o algoritmo utilizado na geração das posições dos pontos de massa da malha, após cada intervalo de tempo especificado (h).

- Para um tempo t , inicialmente igual a 0 e variando de h :

- calcular a força resultante em cada ponto da malha flexível, através dos métodos descritos na seção 3.2;
- conhecidas as forças resultantes e a densidade de massa de cada ponto, através da aplicação das leis de Newton ($F=m \cdot a$, onde m é a densidade de massa e a a aceleração), calcular a aceleração em cada ponto;

- com base nesta aceleração, calcular a velocidade dos pontos através da fórmula:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{d^2x_i}{dt^2} \cdot h, \text{ onde } v_i \text{ representa a velocidade no momento anterior e } \frac{d^2x}{dt^2}, \text{ a aceleração e}$$

- dada a velocidade, encontra-se a nova posição do ponto, da seguinte forma:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{dx_i}{dt} \cdot h, \text{ onde } x_i \text{ é a posição anterior do ponto e } \frac{dx_i}{dt}, \text{ a sua velocidade.}$$

Quanto ao problema de instabilidade numérica do método de Euler, agravada neste caso pela grande descontinuidade gerada pela utilização de molas no modelo, a solução proposta foi a redução do espaço de tempo h , sendo que para cada nova cena da animação gerada, são calculadas diversas posições x_i .

5 Validação do Modelo

De modo a validar o modelo proposto desenvolveu-se um protótipo em linguagem C padrão, denominado FLEX3D. Este protótipo recebe parâmetros de entrada através de arquivos, assim como gera outros arquivos com o resultado da simulação. Foram feitos testes em estações de trabalho SUN, estações SILICON GRAPHICS e em um supercomputador CRAY Y-MP2E/232, mas uma comparação de desempenho foge ao escopo deste trabalho.

Na figura 5 são apresentadas algumas cenas resultantes de uma animação realizada com o objetivo de simular uma superfície que se projeta de uma outra superfície planar e fica pendurada por alguns pontos. Esta animação foi realizada para compor uma das sequências do filme "CG com Filtro" [MUS 92] onde uma folha de papel se "rasga", separando-se de um *outdoor* e ficando pendurada apenas por uma de suas extremidades. Para simular este efeito assumiu-se a força gravitacional nula e um vetor de força externa parametrizado em y e z .

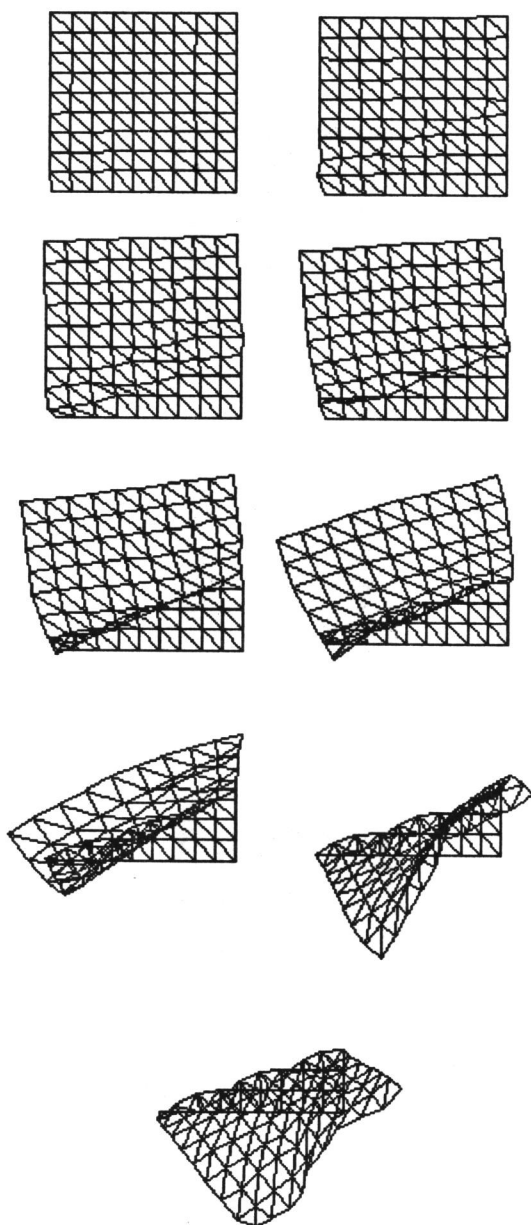


Figura 5: Animação de uma superfície que se projeta de um plano. São apresentados os quadros da animação de

número 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 e 19 da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Na figura 6 visualiza-se uma mesma superfície em duas condições diferentes: (a) é apresentada a superfície em seu estado inicial, ou seja, antes de ser aplicada sobre ela qualquer tipo de força; (b) é mostrada a mesma superfície após 25 segundos de animação. Trata-se do momento no qual, aplicadas as devidas forças, a superfície encontra-se em repouso, ou seja, a partir deste quadro, o deslocamento dos pontos que definem a superfície é insignificante.

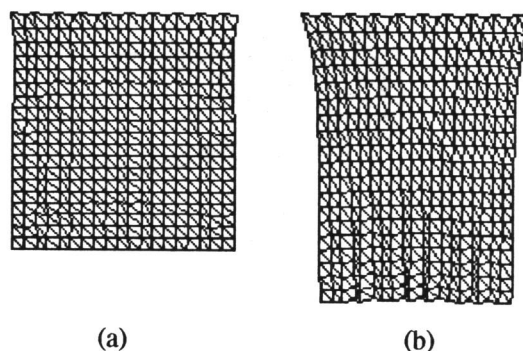
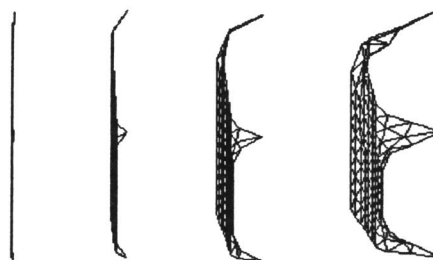


Figura 6: Animação de uma superfície a partir de uma forma inicial, até a sua situação de repouso. (a) Superfície inicial; (b) superfície em repouso.

Na figura 7 apresenta-se o resultado da simulação de uma superfície quadrada que possui 3 de suas 4 extremidades, fixas. Esta superfície é bastante elástica e está inserida em um universo onde inexiste a força gravitacional. No entanto, o seu comportamento é afetado pela força realizada pelo vento e representada através de um vetor de força externa.

Por fim, é apresentado um exemplo através do qual procurou-se apresentar a simulação da queda de uma toalha sobre uma mesa (figura 8). Para tanto, utilizou-se uma malha com uma quantidade considerável de partículas (400) e um objeto externo para simular a mesa, no caso um paralelepípedo. A simulação ocorre considerando-se que a superfície está em queda livre ao colidir com o objeto sólido.



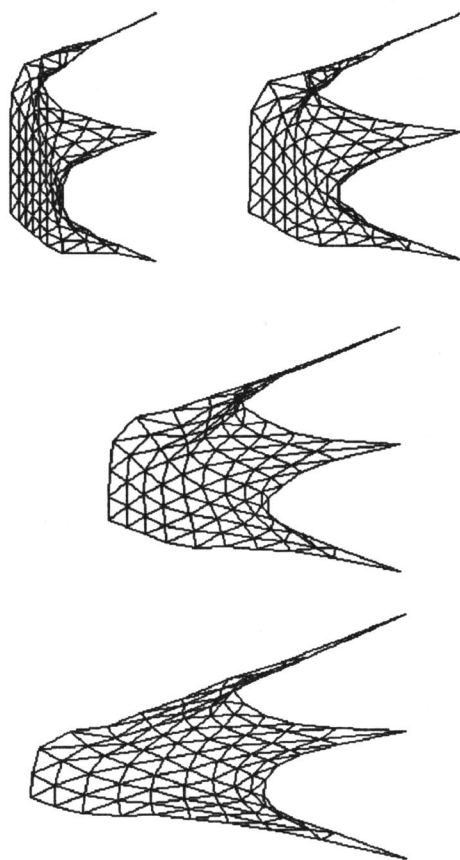


Figura 7: Animação de uma superfície elástica ao vento.

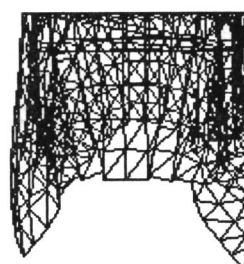
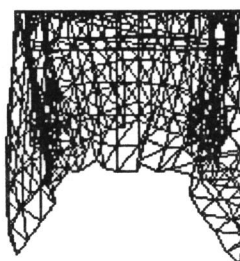
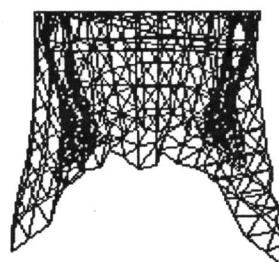
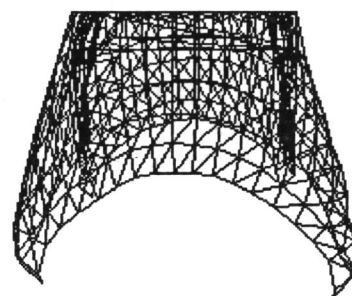
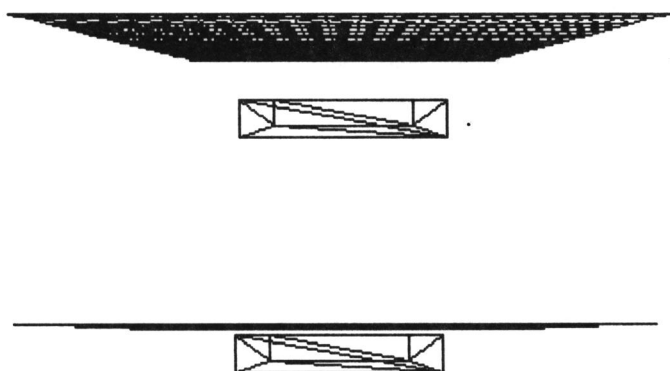


Figura 8: Simulação da queda de uma toalha sobre uma mesa.

Na tabela 1, são apresentados alguns dos parâmetros utilizados na geração das seqüências apresentadas nas figuras 5, 6, 7 e 8.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetros	Figura 5	Figura 6	Figura 7	Figura 8
Gravidade	0 -9.8 0	0 -9.8 0	0 0 0	0 -9.8 0
Força externa	0 -0.39 0.2	0 0 0	0 0 9.8	0 0 0
Coef. atrito	0.18	0.5	0.18	0.6
Dens. de massa	0.5	0.1	0.5	2
Const. elástica	10	10	10	50
Const. curvatura	0	0	0	0

6 Conclusões

Foi apresentado um modelo que permite a deformação de superfícies, com base em simplificações de leis físicas. Este modelo foi construído a partir do estudo da dinâmica de partículas, bem como de molas lineares. Trata-se de um modelo baseado em forças tais como a exercida pelo campo gravitacional e as determinadas pelas características físicas do objeto (como por exemplo a elasticidade e o grau de curvatura e torção).

Desenvolveu-se um método baseado em forças para determinar dinamicamente a configuração geométrica de superfícies com características elásticas, através do cálculo do movimento de partículas. Este cálculo baseia-se em forças que interagem no sistema, sendo importante destacar a criação do conceito de "mola angular".

Admitiu-se, ainda, a existência de restrições geométricas no modelo, como a existência de pontos fixos na superfície e a movimentação destes pontos através da cinemática. No que diz respeito à interação dessas superfícies com o mundo externo, admitiu-se a sua colisão com outros objetos descritos através de polígonos.

O motivo fundamental que impulsionou este trabalho foi o interesse em obter efeitos de animação ainda não disponíveis nos principais sistemas de animação existentes. Considera-se que os resultados obtidos são bastante bons no que diz respeito ao apelo visual. Como pode ser observado na seção 5, as superfícies apresentadas possuem um grau de realismo considerável no que diz respeito à sua aparência, sendo que seu movimento é bastante suave e natural.

Atualmente, o protótipo FLEX3D vem sendo utilizado pelo Grupo de Computação Gráfica da UFRGS na produção de animações.

7 Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao professor Anatólio Laschuk e à Soraia Raupp Musse pelo auxílio na definição do modelo apresentado; ao Grupo de Computação Gráfica da UFRGS pelo apoio recebido e ao CNPq e CAPES por financiarem parcialmente este trabalho.

8 Referências

- [BAR 84] Barr, A.H.. Global and Local Deformations of Solid Primitives, **Computer Graphics**, v. 18, n. 3, 1984.
- [BEC 92] Bechmann, D. e Dubreuil, N., Animation Through Space and Time Based on a Space Deformation Model, **Third Workshop on Animation and Simulation**, Eurographics 92, Cambridge, England, 1992.
- [CAI 92] Carignan, M.; Yang, Y.; Magnenat-Thalmann, N.; Thalmann, D. Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes, **Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 99-104, 1992.
- [CHA 89] Chadwick, J.E.; Haumann, D.R. e Parent, R.E., Layered Construction for Deformable Animated Characters, **Computer Graphics**, v. 23, n. 3, p. 243-252, 1989.
- [COQ 91] Coquillard, S.; Jancène, P. Animated Free-Form Deformation: An Interactive Animation Technique, **Computer Graphics**, v. 25, n. 4, p. 23-26, 1991.
- [DIA 91] Dias, J.M.S.; Rebordão, J.M. Um Modelo Energético para Simulação de Superfícies Deformáveis, **In: IV Encontro Português de Computação Gráfica**, p. 109-124, 1991.
- [MET 92] Metaxas, D.; Terzopoulos, D. Dynamic Deformation of Solid Primitives with Constraints, **Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 309-312, 1992.
- [MUS 92] Musse, S.R.; et all. A Realização do Filme CG com Filtro, **In: SECOMP**, UFRGS-CPGCC, 1992.
- [NED 92] Nedel, L.P. Modelagem e Animação de Superfícies Deformáveis, **In: Proceedings of PANEL'92 - Congresso Latino-Americano de Informática**, Las Palmas, Espanha, 1992.
- [PLA 88] Platt, J.; Terzopoulos, D.; Fleischer, K.; Barr, A. Elastically Deformable Models, **SIGGRAPH 88 Course Notes #27: Developments in Physically-Based Modelling**, p. K1-K25, 1988.
- [PLA 88a] Platt, J.C.; Barr, A.H. Constraint Methods for Flexible Models, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 279-288, 1988.
- [RES 84] Resnick, R.; Halliday, D. Física I, Livros Técnicos e Científicos Editora, RJ, 1984.

[SED 86] Sederberg, T.W.; Parry, S.R. Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, **Computer Graphics**, v. 20, n. 4, p. 151-160, 1986.

[TER 88] Terzopoulos, D.; Witkin, A. Physically Based Models with Rigid and Deformable Components, **IEEE Computer Graphics and Applications**, p. 41-51, 1988.

[TER 88a] Terzopoulos, D.; Fleischer, K. Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 269-278, 1988.

[WEI 86] Weil, J. The Synthesis of Cloth Objects, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 269-278, 1988.