

Aplicações dos computadores - SB
Computação gráfica
Animação: Computação gráfica
Simulações
Deformações
Dinâmica

ENPq 1.03.04.00-2

Simulação de Objetos Deformáveis Baseada na Análise Dinâmica

Luciana Porcher Nedel*

Abstract

This work describes a model for the simulation of 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 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.

O primeiro modelo de representação de objetos deformáveis baseado em física foi desenvolvido objetivando uma simulação estática (sem animação) da realidade. Weil [10] 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 [5] usaram componentes moleculares discretos, para modelar o comportamento elástico dos objetos. Terzopoulos e Fleischer ainda estenderam seu modelo, para incluir componentes flexíveis e rígidos [8] e para permitir a simulação de comportamento inelástico [9].

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 [6], e mais recentemente por Metaxas e Terzopoulos [3]. A simulação de tecidos foi abordada ainda por Dias e Rebordão [2] onde é apresentado um modelo energético para simulação estática e por Carignan, Yang, Magnenat-Thalmann e Thalmann [1], com o desenvolvimento de um modelo dinâmico para simular tecidos complexos.

* nedel@inf.ufrgs.br, Instituto de Informática - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

Este trabalho apresenta 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.

2 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.

2.1 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 .

2.2 Modelo Físico

De modo a simular fisicamente uma malha flexível utilizaram-se as leis da mecânica de partículas uma vez que, segundo [7], 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 simplificação, 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:

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

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.

2.2.1 Gravidade

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

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

onde g representa a aceleração da gravidade e m , a densidade de massa do ponto.

2.2.2 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 pelo vento, por exemplo.

2.2.3 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 de Hooke. Supôs-se a conexão de cada ponto de massa com seus 8 vizinhos, através de molas (figura 1).

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

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

onde km é a constante que indica o grau de elasticidade da mola, P_f o ponto que representa a sua extremidade oscilante e P_r , o ponto de repouso da mola. Pode-se, por extensão, definir

a força de elasticidade como sendo o somatório das forças exercidas pelas molas, no ponto P (representado na figura 1 como sendo a extremidade comum às 8 molas):

$$F_{ELAST} = \sum_{i=0}^7 F_{MOLA_i}$$

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, as constantes devem possuir valores muito baixos.

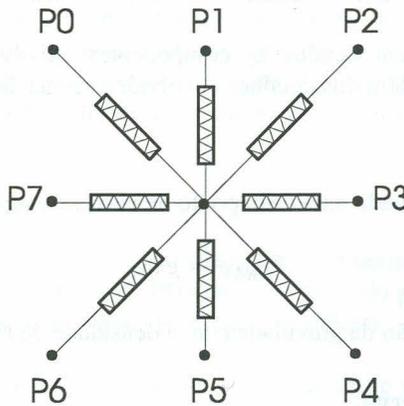


Figura 1 - Modelo elástico da superfície

2.2.4 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 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 2); 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 .

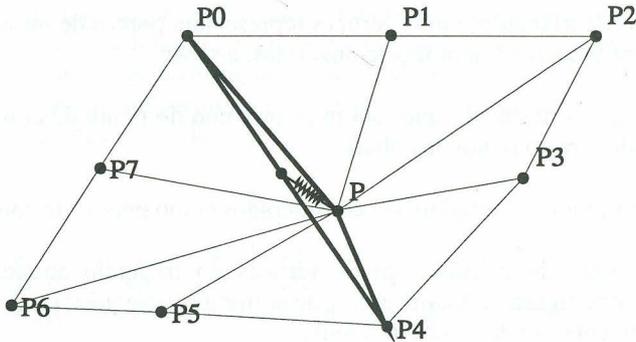


Figura 2 - Mola angular entre os pontos P_0, P e P_4 , com ângulo inferior a 180°

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 um baixo grau de 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 alto grau de 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.

2.2.5 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.

Considerando o modelo geométrico definido na seção 2.1, 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 3. Assim, após este sofrer as consequências da colisão, afetará também diretamente os vértices do triângulo.

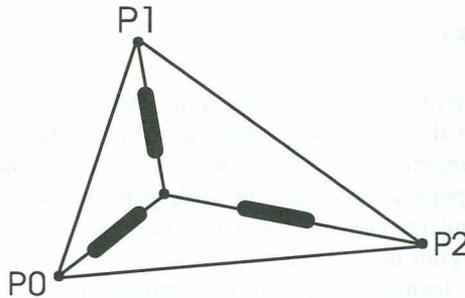


Figura 3 - Colisão de uma partícula com um triângulo

2.2.6 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.

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.

2.2.7 Atrito

Para definir a força de atrito, é fornecido ao sistema um coeficiente que indica o percentual da força resultante que é anulado pelo atrito. Neste modelo, assumiu-se como atrito a resistência do ar, e principalmente, a fricção entre as partes das molas.

3 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.

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 2.2;
- conhecidas as forças resultantes e a densidade de massa de cada ponto, através da aplicação das leis de Newton ($F=m.a$, 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:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{d^2x_i}{dt^2} \cdot h$$
 onde v_i representa a velocidade no momento anterior e $\frac{d^2x}{dt^2}$, a aceleração e
- dada a velocidade, encontra-se a nova posição do ponto, da seguinte forma:

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

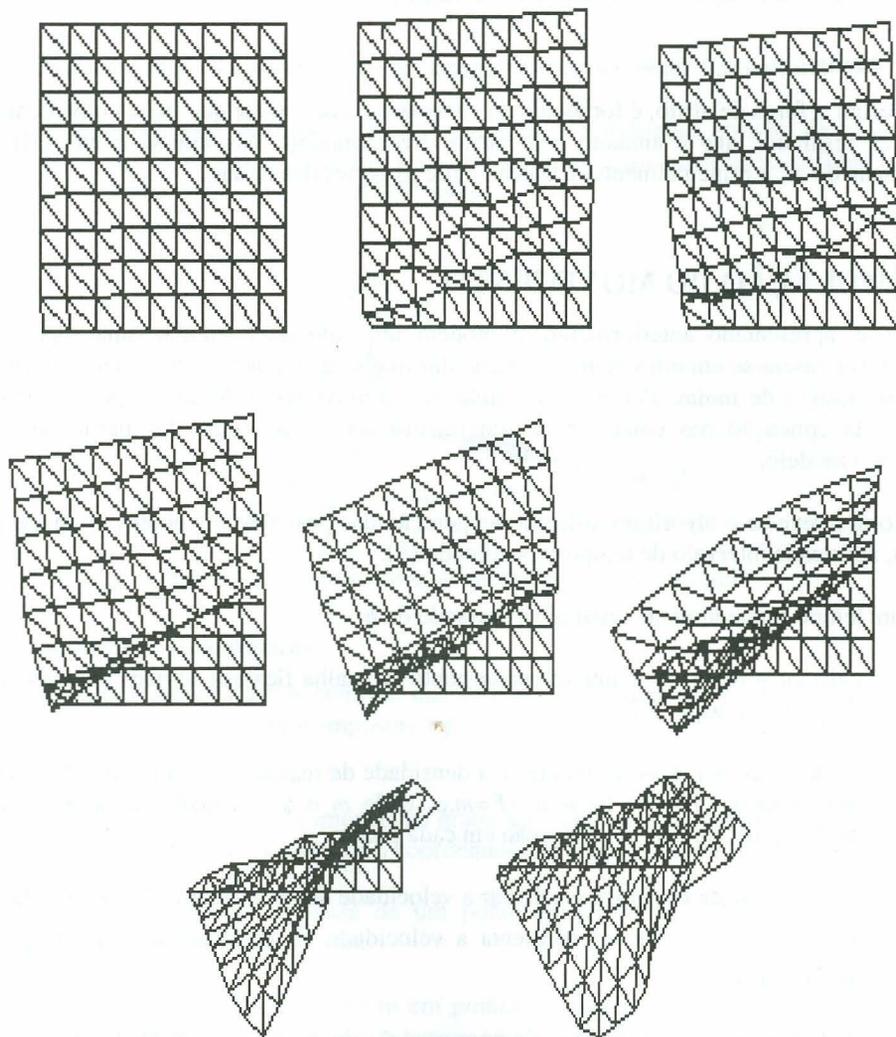


Figura 4 - Animação de uma superfície que se projeta de um plano.

4 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.

Na figura 4 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 compôr uma das sequências do filme "CG com Filtro" [4] onde uma folha de papel se rasga de um *outdoor* 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.

Por fim, na figura 5 é apresentado um exemplo através do qual procurou-se apresentar o resultado da simulação da queda de uma toalha sobre uma mesa. 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 flexível está em queda livre ao colidir com o objeto sólido.

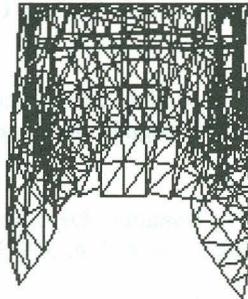


Figura 5 - Resultado da simulação da queda de uma toalha sobre uma mesa.

5 CONCLUSÕES

Foi apresentado um modelo que permite a deformação de superfícies, com base em leis físicas. Este modelo foi construído a partir do estudo da dinâmica de partículas, bem como das molas ideais de Hooke. 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). Utilizou-se um método baseado em forças para determinar dinamicamente a configuração geométrica de superfícies com características elásticas.

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.

Considera-se que os resultados obtidos são bastante bons no que diz respeito ao apelo visual. Como pode ser observado na seção 4, 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.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, professor Flávio Wagner e professora Carla Freitas; 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.

Referências

- [1] Carignan, M.; Yang, Y.; Magnenat-Thalmann, N. e Thalmann, D. Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes, **Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 99-104, 1992.
- [2] Dias, J.M.S. e Rebordão, J.M. Um Modelo Energético para Simulação de Superfícies Deformáveis, **In: IV Encontro Português de Computação Gráfica**, p. 109-124, 1991.
- [3] Metaxas, D. e Terzopoulos, D. Dynamic Deformation of Solid Primitives with Constraints, **Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 309-312, 1992.
- [4] Musse, S.R.; et all. A Realização do Filme CG com Filtro, **In: SECOMP**, UFRGS-CPGCC, 1992.
- [5] Platt, J.; Terzopoulos, D.; Fleischer, K. e Barr, A. Elastically Deformable Models, **SIGGRAPH'88 Course Notes #27: Developments in Physically-Based Modelling**, p. K1-K25, 1988.
- [6] Platt, J.C. e Barr, A.H. Constraint Methods for Flexible Models, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 279-288, 1988.
- [7] Resnick, R. e Halliday, D. Física I, Livros Técnicos e Científicos Editora, RJ, 1984.

- [8] Terzopoulos, D. e Witkin, A. Physically Based Models with Rigid and Deformable Components, **IEEE Computer Graphics and Applications**, p. 41-51, 1988.
- [9] Terzopoulos, D. e Fleischer, K. Modeling Inelastic Deformation : Viscoelasticity, Plasticity, Fracture, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 269-278, 1988.
- [10] Weil, J. The Synthesis of Cloth Objects, **Computer Graphics**, v. 22, n. 4, p. 269-278, 1988.

Este artigo foi publicado originalmente nos Anais do XII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, como Dissertação premiada em 1^o. lugar no Concurso de Teses e Dissertações de 1993. O trabalho foi orientado por Flavio Rech Wagner e Carla Maria Dal Sasso Freitas.