

# Animação de Corpos Rígidos e Tratamento de Colisões Utilizando Análise Dinâmica

ROBSON RODRIGUES LEMOS  
RUI MANUEL R. DE BASTOS  
CARLA M. D. S. FREITAS

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação - CPGCC  
Caixa Postal 15064 - CEP 91591-970  
Porto Alegre, RS, Brasil  
{robson, carla}@inf.ufrgs.br  
rmb@bruna.inescn.pt

**Abstract.** The goal of the motion control methods for physically based computer animation is to simulate the behavior of objects according to physical laws that govern a certain virtual world. The present work uses the dynamics for rigid bodies as a motion control method for computer animation of non-articulated rigid bodies. We present the strategies that allow the treatment of interactions (collisions) among rigid bodies or between them and the environment.

## 1 Introdução

Tradicionalmente, a produção de uma seqüência animada do movimento de um objeto é realizada através da especificação de posições e orientações no espaço e no tempo. Tais posições e orientações são interpoladas produzindo uma seqüência que é, na realidade, uma alternativa para o movimento daquele objeto.

Tal forma de descrição de movimento, entretanto, é restrita na produção de movimentos realísticos, principalmente, quando complexos. O animador é obrigado a utilizar a intuição e testar diferentes combinações de parâmetros e leis de interpolação até obter a seqüência mais próxima da desejada.

Nos últimos anos, a descrição explícita de movimentos complexos passou a ser substituída por outros métodos de controle [Foley et al. (1990)]. Os métodos de controle de movimento em animação por computador que fazem uso de simulação dinâmica têm apresentado resultados bem interessantes. Trabalhos realizados dentro deste contexto permitem a produção de movimentos realísticos de objetos, modelados fisicamente, através da resolução de equações dinâmicas de movimento associadas aos objetos.

Este trabalho apresenta as características necessárias para a modelagem com simulação física de um sistema dinâmico de corpos rígidos sob a ação de forças e torques. Um protótipo, implementado como parte do estudo, é descrito e os resultados iniciais obtidos são apresentados. A simulação do comportamento fundamental de corpos rígidos permite a incorporação de características como reações realísticas durante possíveis interações [Hahn (1988), Moore-

Wilhelms (1988) e Wilhelms (1990)] e articulações para produção de movimentos de corpos rígidos articulados [Barr-Barzel (1988), Hahn (1988) e Moore-Wilhelms (1988)].

## 2 Dinâmica do movimento de corpos rígidos

Trabalhos realizados em simulação dinâmica de corpos rígidos têm focalizado corpos rígidos articulados e não-articulados.

Na modelagem dos objetos (corpos rígidos) devem estar contempladas todas as características necessárias à simulação dinâmica, ou seja:

- **atributos geométricos:** posições e orientações no espaço;
- **atributos físicos:** propriedades de massa (centro de massa, massa total e tensor de inércia);
- **estímulos aplicados sobre o objeto:** forças e torques;
- **restrições:** vínculos que atuam no mundo virtual (ambiente).

Estas características determinam a descrição do estado do sistema dinâmico em algum instante de tempo. A partir deste estado dinâmico, é possível determinar sua evolução ao longo do tempo através de equações dinâmicas de movimento.

A seguir, a obtenção das equações de movimento é detalhada, abordando-se o problema encontrado com a aplicação direta da equação de [Barr-Barzel (1988)].

Para a descrição do movimento de um corpo rígido são utilizados dois sistemas de referência: o sistema de referência do universo (SRU), denominação do sistema de referência inercial, fixo no espaço, e o sistema de referência do objeto (SRO), fixo no corpo, com origem no centro de massa do corpo.

As coordenadas do corpo podem ser transformadas para coordenadas do universo através de rotações e translações:

$$\vec{P}_u = \vec{c}_i + R_i \vec{P}_o$$

onde, para um corpo  $i$ ,  $\vec{P}_u$  é um ponto P do objeto representado no SRU,  $\vec{c}_i$  é o vetor do centro de massa do corpo (posição representada no SRU),  $R_i$  é a matriz de rotação (orientação) e  $\vec{P}_o$  é o ponto P do objeto representado no SRO.

Como se vê na equação acima, conhecida a posição de um ponto do objeto ( $\vec{P}_o$ ), com relação ao centro de massa ( $\vec{c}_i$ ), aplica-se a matriz de rotação  $R_i$  do objeto  $i$ , e realiza-se a rotação desse ponto do objeto com relação ao centro de massa. A adição ao vetor  $\vec{c}_i$  realiza a translação do objeto, já que o movimento translacional de um objeto pode ser descrito pela translação do seu centro de massa. Desta forma, verifica-se que a dinâmica do movimento de um objeto é realizada tratando, isoladamente, a translação e a rotação desse objeto.

O movimento translacional de um corpo rígido é determinado por forças externas atuando em um ponto de massa do corpo localizado em seu centro de massa. Assim sendo, a dinâmica do movimento translacional de corpos rígidos sob ação de forças externas pode ser determinada resolvendo-se um conjunto de equações diferenciais ordinárias acopladas:

$$m \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_j$$

$$\frac{d\vec{c}_i}{dt} = \vec{v}_i$$

onde, para um corpo  $i$ ,  $\vec{F}_j$  são os vetores de forças externas atuando no corpo,  $m$  é a massa total do corpo,  $\vec{v}_i$  é o vetor velocidade linear do corpo e  $\vec{c}_i$  é o vetor de centro de massa do corpo (posição em função do tempo). Todos estes vetores são representados no SRU.

O movimento rotacional sobre o centro de massa de um corpo rígido é determinado por torques externos atuando no corpo. Os torques externos,  $\vec{T}_i$ , resultam de forças externas do corpo,  $\vec{F}_i$ , atuando em um ponto de massa do corpo,  $\vec{P}_i$  com localização diferente do centro de massa:

$$\vec{T}_i = \vec{P}_i \times \vec{F}_i$$

Desta forma, a dinâmica do movimento rotacional de corpos rígidos sob ação de torques externos deve ser resolvida no SRO, através de um conjunto de equações diferenciais ordinárias acopladas conhecidas como equações de Euler [Marion (1970)]:

$$\begin{aligned} I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z &= T_x \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z)\omega_x\omega_z &= T_y \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y &= T_z \end{aligned}$$

onde, para um corpo  $i$ ,  $\vec{T}$  são os vetores de torques externos atuando no corpo,  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$  são os momentos de inércia sobre o centro de massa e  $\vec{\omega}$  são os vetores de velocidades angulares do corpo. Todos estes vetores são representados no SRO.

A distribuição de massa (representada pelo tensor de inércia) para objetos simétricos requer três momentos de inércia ( $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$ ), cada um sobre cada eixo (X, Y e Z) [Wilhelms (1988)].

Para obter a matriz de rotação,  $R_i$  que determina a orientação em função do tempo, utilizou-se, inicialmente, a equação [Barr-Barzel (1988)]:

$$\frac{dR}{dt} = \omega^* R$$

onde  $\omega^*$  é o dual de  $\vec{\omega}$ , definido por:

$$\omega^* = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

As matrizes de rotação  $R$ , resultante da integração independente das nove componentes de  $R$  numericamente, ao longo do tempo, quando aplicadas aos pontos do objeto (para resultar na rotação destes pontos em relação ao centro de massa) apresentam problema pois não é mantida a descrição geométrica original do objeto ao longo do tempo.

Assim sendo, utilizou-se o seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas, para obter a matriz de rotação  $R_i$  [Hahn (1988) e Marion (1970)]:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega_x \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \omega_y \\ \frac{d\beta}{dt} &= \omega_z \end{aligned}$$

onde,  $\theta, \alpha$  e  $\beta$  (ângulos de rotação no sentido anti-horário sobre os eixos X, Y e Z respectivamente) são integrados numericamente, ao longo do tempo, e substituídos nas matrizes  $R$ . Desta forma, o número de integrações numéricas (sujeitas a erro) foi reduzido e as substituições de  $\theta, \alpha$  e  $\beta$  nas matrizes  $R$ , ao longo do tempo, não apresentam os problemas detectados.

### 3 Tratamento de colisões de corpos rígidos

A estratégia a ser utilizada, neste trabalho, para a colisão considera que num determinado instante de tempo existe apenas um ponto de toque entre dois objetos. Existem dois tipos de estratégias para se detectar o ponto de toque entre dois objetos [Hahn (1988)] : determinar a intersecção do vértice das arestas de um objeto com a face poligonal de outro objeto e determinar a intersecção da aresta de um objeto com uma face de outro objeto.

Na análise de impacto, para resolver a dinâmica, pretende-se utilizar um método analítico [Moore-Wilhelms (1988)] que preserva o momento linear e o momento angular durante a colisão e resulta em uma nova velocidade linear e uma nova velocidade angular para cada corpo rígido.

Este tratamento da colisão permite ao sistema de animação realizar, em tempo de simulação, um controle automático da restrição de que dois objetos geométricos, descritos fisicamente como corpos rígidos, ao colidirem, não podem se interpenetrar. Desta forma, permite-se incorporar ao método de controle de movimentos reações realísticas a colisões.

### 4 Protótipo para animação de corpos rígidos utilizando análise dinâmica

A fim de validar o estudo sobre a dinâmica de corpos rígidos como método de controle de movimento, foi construído um protótipo, composto de:

- **Primitivas de Corpos Rígidos:** coleção de corpos rígidos, modelados geometricamente por uma malha de pontos conectados para formar polígonos e é assumida distribuição de massa homogênea, tais como, esferas, cubos, paralelepípedos, pirâmides, cilindros e cones. Cada tipo de corpo tem definidos os atributos necessários para simulação física (centro de massa, eixos principais, momentos de inércia sobre o centro de massa e massa total).
- **Pontos de Controle:** pontos pertencentes ao corpo representados no SRO ou no SRU.
- **Forças Externas:** forças externas atuando no corpo. As forças externas, atuando em um ponto de massa do corpo com localização diferente do centro de massa, são representadas no SRO e as forças externas, atuando no centro de massa, são representadas no SRU. Cada força é um vetor que aponta para um ponto de controle. Estas forças podem atuar nos pontos de massa de uma forma constante (forças atuando durante todo o intervalo de tempo, por exemplo a força gravitacional) e de uma forma ins-

tantânea (forças atuando somente no instante inicial de tempo, por exemplo uma força inicial informada para arremessar uma borracha).

A simulação é realizada a partir da descrição do estado inicial do sistema dinâmico (figura 1). O estado dinâmico em um tempo  $\Delta t$  posterior é obtido a partir do estado dinâmico inicial (onde  $\Delta t$  corresponde ao incremento de tempo entre os quadros de animação). Assim, cada estado subsequente é obtido a partir do estado anterior. Durante a resolução das equações de movimento, utilizando-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem [Press et al. (1988)] são armazenados em um arquivo as novas posições e orientações dos objetos ao longo do tempo.

```

INICIO_SIMULACAO
/* Tempo Inicial e Tempo Final */
TEMPO 0.0 12.0
INICIO_OBJETO
/* Tipo de Corpo Rígido */
TIPO paralelepipedo
/* Densidade de Massa */
DENSIDADE 1000
/* Posicoes do Centro de Massa */
POSICAO_SRU 0.0 0.0 0.0
/* Velocidade Linear */
VEL_LIN_SRU 0.0 0.0 0.0
/* Forcas Ext. Inst. no Centro de Massa */
FORCA_EXT_SRU_INS -1000.0 -800.0 0.0
/* Angulos de orientacao do SRU -> SRO */
ORIENTACAO_SRU_SRO 0.0 0.0 0.0
/* Velocidades Angulares */
VEL_ANG_SRO 0.0 0.0 0.0
/* Ponto de Controle */
PONTO_CONTR_SRO -0.05 0.09 0.0
/* Forca Ext. Inst. no Ponto de Controle */
FORCA_EXT_SRO_INS -5.0 0.09 0.0
FIM_OBJETO
FIM_SIMULACAO

```

Figure 1: Estado do sistema dinâmico inicial para simulação

### 5 Resultados iniciais

De acordo com o objeto apresentado na figura 2, um paralelepípedo de lados 0,10m em X, 0,18m em Y e 0,02m em Z de massa homogênea com lados paralelos aos eixos do SRU e centro de massa na origem do SRU inicialmente parado linear e angularmente com duas forças externas instantâneas agindo sobre ele: uma agindo apenas translacionalmente,  $\vec{F}_1$ , e outra gerando também, torque,  $\vec{F}_2$ , e sob, a ação da gravidade (força externa constante) é representado

na figura 1 a descrição do estado dinâmico inicial para sua simulação. Os resultados de 12 segundos de animação são apresentados na figura 3. O comportamento realístico deste paralelepípedo deve-se ao fato da utilização de equações dinâmicas de movimento obtidas da mecânica newtoniana.

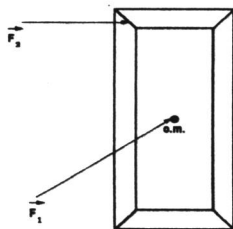


Figure 2: Paralelepípedo com direção e sentido das forças externas instantâneas  $\vec{F}_1$  e  $\vec{F}_2$  atuando sobre o objeto

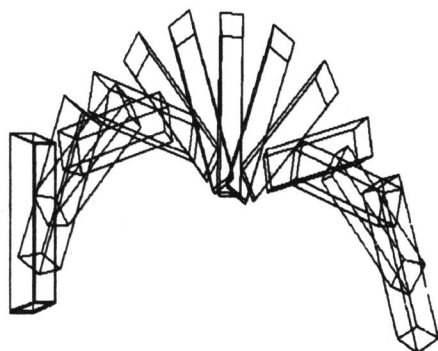


Figure 3: Arremesso de um paralelepípedo (14 quadros gerados durante 12 segundos de animação, através do sistema de animação PREVIEW/ANIMAKER [Schmidt-Musse (1992) e Silva (1992)])

## 6 Conclusão

Durante o decorrer deste trabalho, verificou-se que a estratégia adotada na dinâmica do movimento é suficientemente genérica para ser estendida com o objetivo de permitir a simulação de corpos rígidos articulados.

A geração do movimento através de equações dinâmicas baseadas em leis físicas fornece um alto grau de realismo. Pode-se, ainda, utilizar métodos de controle que permitam adição de mais níveis de realismo e controle, tais como detecção de colisões e respostas.

Apesar das limitações no controle, permitindo apenas o fornecimento da informação de estímulos iniciais (de uma forma não intuitiva para o usuário), este trabalho está atingindo seus objetivos como uma plataforma de testes para validação de um ambiente básico onde poderão ser simuladas interações entre objetos e dos mesmos com o ambiente.

## Agradecimentos

À professora Beatriz Gay, pelos esclarecimentos sobre Dinâmica, ao professor Flávio Wagner, pelo apoio, aos colegas Soraia, Rodrigo, Assis e Rosana pelo auxílio técnico.

## Referências

- Barr, A. H. & Barzel, R. Controlling rigid bodies with dynamic constraints. In: *Developments in physically-based modeling*, New York, SIGGRAPH, August, 1988, Course Notes.
- Foley, J.; Van Dam A.; Feiner, S.; Hughes, J. *Computer graphics principles and practice*. 2. ed., New York: Addison Wesley, 1990.
- Hahn, J. K. Realistic animation of rigid bodies. *Computer Graphics*, New York, v.22, n.4, p.299-308, Aug. 1988.
- Marion, J. B. *Classical dynamics of particles and systems*. New York: Academic Press, 1970. 407p.
- Moore, M. & Wilhelms, J. Collision detection and response for computer animation. *Computer Graphics*, New York, v.22, n.4, pp.289-298, Aug. 1988.
- Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T. *Numerical recipes in C - the art of scientific computing*. New York, Cambridge University Press, 1988.
- Schmidt, A. E.; Musse, S. R. *PREVIEW - Sistema de Animação*. Porto Alegre: CPGCC-UFRGS, 1992. Relatório de Pesquisa no.184.
- Silva, R. *ANIMAKER - Sistema de Animação*. Porto Alegre: II-UFRGS, 1992. Trabalho de Conclusão do Curso de Ciência da Computação.
- Wilhelms, J. Dynamics for computer graphics: A tutorial. *Computing Systems*, v.1, n.1, pp.63-93, Winter 1988.
- Wilhelms, J. Behavioral animation using an interactive network. In: *COMPUTER ANIMATION'90*, 1990, Geneva/Switzerland. *Proceedings...*, Tokio: Springer-Verlag, 1990. 237p. p.95-106.