

# Animação da Dinâmica do Movimento e Colisões de Corpos Rígidos

Robson R. Lemos \*  
Rui Manoel R. de Bastos †  
Carla M. D. S. Freitas ‡  
Flávio R. Wagner §

## RESUMO

Os métodos de controle de movimento em animação baseados na física, e utilizados em computação gráfica, têm como objetivo simular o comportamento de objetos de acordo com as leis físicas que governam o mundo virtual adotado. Este trabalho utiliza a dinâmica de corpos rígidos como método de controle de animação por computador aplicada a movimentos de corpos rígidos (não articulados). São apresentadas estratégias que estendem este método para possibilitar o tratamento de interações (colisões) entre corpos rígidos ou dos mesmos com o ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Animação, Simulação, Dinâmica, Corpos rígidos

---

\*Bacharel em Ciência da Computação, UFSC, BR, 1987 e atualmente cumprindo o programa de mestrado na UFRGS, BR.

†Mestre em Ciência da Computação, UFRGS, BR, 1992.

‡Mestre em Ciência da Computação, UFRGS, BR, 1982, atualmente cumprindo o programa de doutorado na UFRGS, BR, e professora do Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, UFRGS, BR.

§Doutor em Ciência da Computação, Kaiserlautern, RFA, 1983 e professor do Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, UFRGS, BR. Instituto de Informática - UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação - CPGCC, Av. Bento Gonçalves, 9500 Bloco IV - Agronomia - Campus do Vale, CEP 91501 - Porto Alegre - RS - Brasil, Caixa Postal: 15064 FAX: (051) 336-5576, E-mail: robson@inf.ufrgs.br

# 1 INTRODUÇÃO

Quando um animador descreve o movimento de objetos no tempo e no espaço sem levar em conta as forças e torques que causam este movimento, ele é obrigado a usar de sua intuição para produzir movimentos próximos da realidade. No momento que surgem movimentos mais complexos a serem descritos, esta descrição explícita do movimento pode ser substituída por outros métodos de controle de movimento [2].

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.

A abordagem dada ao problema da simulação do comportamento fundamental de corpos rígidos num dado mundo virtual permite a incorporação de outras características aos objetos: reações realísticas durante possíveis interações e articulações para produção de movimentos de corpos rígidos articulados.

## 2 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE CORPOS RÍGIDOS

Para que a simulação dinâmica ocorra, devem estar associadas aos objetos (corpos rígidos), as seguintes características: atributos geométricos (posições e orientações), atributos físicos (propriedades de massa), estímulos (forças e torques) e 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.

### 2.1 MODELAGEM COM SIMULAÇÃO FÍSICA

Como é abordada a modelagem com simulação física para corpos rígidos, o sistema físico deve estar condizente com a dinâmica clássica de corpos rígidos [8] e [4]. Para a modelagem são realizadas as seguintes etapas:

- Descrição física do objeto: um corpo rígido pode ser visto como uma coleção de partículas discretas ou como uma distribuição contínua da matéria. Desta forma, sua massa total não é concentrada em um único ponto, mas distribuída no espaço, tornando, assim, seu movimento rotacional significativo. No espaço tridimensional um corpo rígido apresenta seis graus de liberdade (coordenadas independentes). A posição do corpo pode transladar, no sistema de coordenadas do universo (SRU), em três direções (X, Y e Z) e a orientação do corpo pode variar em três ângulos independentes, os quais fornecem a orientação do sistema de coordenadas do universo (SRU) em relação ao sistema de coordenadas do corpo (SRO). São considerados objetos com geometria simples modelados geometricamente por uma malha de pontos conectados para formar polígonos e com distribuição de massa homogênea. As propriedades de massa necessárias para a simulação são as seguintes: massa total, centro de massa

e tensor de inércia. O tensor de inércia é responsável pela distribuição de massa do corpo rígido. Uma vez determinado o tensor de inércia, no sistema de coordenadas do corpo, ele não se modifica durante o movimento.

- **Formulação das equações dinâmicas** : para formular as equações dinâmicas é utilizada a formulação newtoniana. Esta formulação é mais apropriada para movimentos simples e por isto é, normalmente, utilizada na simulação de partículas [5] e corpos rígidos [1], [6] e [5].
- **Resolução das equações dinâmicas**: as estratégias de resolução das equações dinâmicas são definidas segundo critérios relacionados aos métodos de controle de movimento (vide seção 2.2) utilizados na simulação dinâmica. Atributos físicos, tais como, massa total, centro de massa e tensor de inércia são considerados variáveis conhecidas das equações de movimento e podem ser assumidos constantes. As variáveis desconhecidas das equações de movimento são definidas de acordo com as estratégias adotadas pelos métodos de controle de movimento aplicados à simulação dinâmica.
- **Integração das equações dinâmicas**: para produzir o movimento dos objetos, são resolvidos sistemas de equações diferenciais de primeira ordem (vide seção 3), acopladas ou não, utilizando-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem [11].

## 2.2 MÉTODOS AUTOMÁTICOS PARA CONTROLE DE MOVIMENTOS

Durante o movimento de corpos rígidos podem surgir interações (tais como, colisões) destes objetos com outros objetos ou com o ambiente. Para realizar um controle automático destas interações utiliza-se métodos de controle de movimento que permitam a combinação de respostas físicas automáticas (por exemplo, objeto caindo com a força da gravidade, forças e torques resultantes do impacto entre objetos) com sugestões de controle especificadas pelo usuário (por exemplo, forças e torques externas atuando no movimento de um objeto). Conforme citado por Wilhelms [12], estes métodos de controle operam em baixo nível (em termos de controle de movimentos dos graus de liberdade de um único corpo rígido ou de corpos rígidos articulados com poucas articulações) e em alto nível (em termos de controle da locomoção de corpos rígidos articulados ou de controle comportamental). Para este trabalho são utilizados métodos de controle de movimento que operam em baixo nível, tais como, análise dinâmica e detecção de colisões e resposta.

## 3 DINÂMICA DO MOVIMENTO DE CORPOS RÍGIDOS

Como vimos acima, um corpo rígido apresenta seis graus de liberdade. Para representar as novas posições e orientações dos objetos, ao longo do tempo, são utilizados dois sistemas de coordenadas: sistema de coordenadas do universo (denominação do sistema de coordenadas inerciais, fixo no espaço, para computação gráfica) e o sistema de coordenadas do corpo (fixo no corpo, com sua origem no centro de massa do corpo). Desta forma, as coordenadas

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

$$\vec{P} = \vec{c}_i + R_i \vec{P}'$$

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

Esta divisão, em translações e rotações para representação geométrica de um objeto em computação gráfica pode ser estendida para resolução da dinâmica do movimento.

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:

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

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

onde para um corpo  $i$ ,  $F_j$  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,  $\vec{P}_i$  (em uma localização diferente do centro de massa):

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

Dessa forma, a dinâmica do movimento rotacional de corpos rígidos sob ação de torques externos pode ser resolvida no sistema de coordenadas do corpo (SRO), através de um conjunto de equações diferenciais ordinárias acopladas conhecidas como equações de Euler [8]:

$$I_x \frac{d\vec{\omega}_x}{dt} + (I_z - I_y) \vec{\omega}_y \vec{\omega}_z = \vec{T}_x$$

$$I_y \frac{d\vec{\omega}_y}{dt} + (I_x - I_z) \vec{\omega}_x \vec{\omega}_z = \vec{T}_y$$

$$I_z \frac{d\vec{\omega}_z}{dt} + (I_y - I_x) \vec{\omega}_x \vec{\omega}_y = \vec{T}_z$$

onde para um corpo  $i$ ,  $\vec{T}_i$  são os vetores de torques externos atuando no corpo,  $I$  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.

E, para obter a matriz de rotação,  $R_i$  (orientação em função do tempo), pode-se utilizar a seguinte equação [1]:

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

onde nessa equação  $\omega^*$  é o dual de  $\vec{\omega}$ , o qual pode ser definido da seguinte forma:

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

## 4 TRATAMENTO DE COLISÕES DE CORPOS RÍGIDOS

O tratamento da colisão entre corpos rígidos envolve a detecção do ponto no qual os objetos se tocam e o cálculo da dinâmica do impulso resultante deste toque [6] e [10]. A estratégia utilizada 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 [6]: o ponto de toque resultante da intersecção do vértice das arestas de um objeto com o polígono de outro objeto e o resultante da intersecção da aresta de um objeto com o polígono de um outro objeto. A análise de impacto, para resolver a dinâmica, utiliza um método analítico [9] que preserva o momento linear e o momento angular durante a colisão e resulta em uma nova velocidade linear e em 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.

Este método automático para controle de movimento está sendo, atualmente, integrado às rotinas desenvolvidas para análise dinâmica. Desta forma, estende-se o método de controle de movimentos para incluir reação realística a colisões.

## 5 PROTÓTIPO PARA ANIMAÇÃO DE CORPOS RÍGIDOS UTILIZANDO ANÁLISE DINÂMICA

O protótipo é composto de:

- Primitivas de Corpos Rígidos: coleção de corpos rígidos, tais como, esferas, cubos, paralelepípedos, pirâmides, cilindros e cones. Cada tipo de corpo define as quantidades necessárias para simulação física, tais como, centro de massa, eixos principais, momentos de inércia sobre o centro de massa e massa total.
- Pontos de Controle: pontos do corpo representado no SRO ou no SRU.
- Forças Externas: forças externas atuando no corpo. As forças externas são representadas no SRU, por ser uma forma mais intuitiva, e cada força contém uma referência para um ponto de controle em que está sendo fornecida.

A simulação é realizada a partir da descrição do estado do sistema dinâmico inicial (Figura 1). O estado dinâmico em um tempo  $dt$  mais tarde é obtido a partir do estado dinâmico inicial (onde  $dt$  corresponde ao incremento de tempo entre os quadros de animação). E, assim, cada estado subsequente é obtido a partir do estado anterior. Durante a resolução das equações de movimento são armazenados em um arquivo as novas posições e orientações dos objetos ao longo do tempo.

```

INICIO_SIMULACAO
TEMPO 0.0 0.5          /* Tempo Inicial e Tempo Final */
INICIO_OBJETO
TIPO cubo              /* Tipo de Corpo Rigido */
DENSIDADE 0.0001      /* Densidade de Massa */
POSICAO_SRU 10.0 300.0 10.0 /* Posicoes do Centro de Massa */
VEL_LIN_SRU 0.0 0.0 0.0 /* Velocidade Linear */
FORCA_EXT_SRU -2500.0 -25000.0 10000.0 /* Forcas Ext. no Centro de Massa*/
ORIENTACAO_SRU_SRO 0.0 0.0 0.0 /* Angulos de orientacao do SRU -> SRO */
VEL_ANG_SRO 0.0 0.0 0.0 /* Velocidades Angulares */
PONTO_CONTR_SRO -50.0 50.0 50.0 /* Ponto de Controle*/
FORCA_EXT_SRU -24990.0 10.0 50 /* Forca Ext. no Ponto de Controle*/
FIM_OBJETO
FIM_SIMULACAO

```

Figura 1: Estado do sistema dinâmico inicial para simulação

## 6 RESULTADOS INICIAIS

De acordo com o exemplo de um estado dinâmico inicial apresentado na figura 1, apresenta-se na figura 2 o movimento resultante de um cubo com distribuição de massa homogênea e arestas de dimensões iguais a 100 metros sob ação de forças e torques externos caindo com a força da gravidade. O comportamento realístico deste cubo deve-se ao fato da utilização de equações dinâmicas de movimento obtidas da mecânica newtoniana.

## 7 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. Porém, deve-se explorar 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 das equações dinâmicas apresentadas, 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

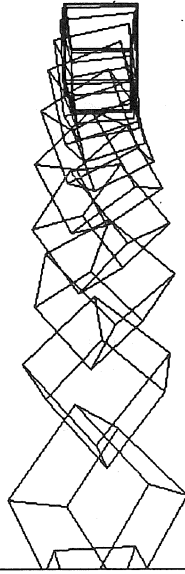


Figura 2: Cubo caindo a partir de um estado dinâmico inicial (quadros gerados através do sistema de animação PREVIEW)

para validação de um ambiente básico onde poderão ser simuladas interações entre objetos e dos mesmos com o ambiente

### AGRADECIMENTOS

À professora Beatriz Gay (Instituto de Física - UFRGS) pelas conversas e esclarecimentos sobre as leis da Física, aos colegas Soraia e Rodrigo pelo auxílio junto ao PREVIEW e aos companheiros Assis e Rosana.

### Referências

- [1] BARR, A. H. & BARZEL, R. Controlling rigid bodies with dynamic constraints. In: Developments in physically-based modeling, New York, SIGGRAPH, August, 1988, Course Notes.
- [2] FOLEY, J.; Van DAM A.; FEINER, S.; HUGHES, J. *Computer graphics principles and practice*. 2. ed., New York: Addison Wesley, 1990.
- [3] FREITAS, C. M. D. S. *Técnicas de visualização em simulação*. Porto Alegre: CPGCC/UFRGS, Julho, 1990 (Trabalho Individual).
- [4] GOLDSTEIN, H. *Classical mechanics*. Massachusetts: Addison Wesley, 1983.

- [5] GREEN, M. Using dynamics in computer animation: control and solution issues. In: *Making them Move mechanics, control, and animation of articulated figures*. 1991, p.281-314.
- [6] HAHN, J. K. Realistic animation of rigid bodies. *Computer Graphics*, New York, v.22, n.4, p.299-308, Aug. 1988.
- [7] LEMOS, R. R. *Um Ambiente de visualização 3D*. Porto Alegre, CPGCC/UFRGS, Abril, 1990 (Trabalho Individual).
- [8] MARION, J. B. *Classical dynamics of particles and systems*. New York:Academic Press, 1970. 407p.
- [9] MOORE, M & WILHELMS, J. Collision detection and response for computer animation. *Computer Graphics*, New York, v.22, n.4, pp.289-298, Aug. 1988.
- [10] NETO, M. M. & BASTOS, R. M. BEZIER4D - Ambiente para modelagem, visualização e animação tridimensional. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 4., julho, 1991. *Anais, SIBGRAPI' 91*, ed. J. A. Zuffo /et. al./ São Paulo: EPUSP, 1991. XIV, 266p.
- [11] 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.
- [12] WILHELMS, J. Behavioral animation using an interactive network. In: COMPUTER ANIMATION'90, 1990, Geneva/Switzerland. *Proceedings...*, Tokio:Springer-Verlag, 1990. 237p. p.95-106.