

## CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTROLE DAS IMAGENS MÓVEIS EM COMPUTAÇÃO

Inhaúma Ferraz e Aura Conci / Instituto de Computação- UFF

### 1. RESUMO

A evolução dos equipamentos vem possibilitando usar o computador para gerar imagens de sistemas em movimento. Para permitir a passagem da animação por computador das mãos dos programadores para as mãos da comunidade artística é necessário o desenvolvimento de ferramentas de *script* de alto nível ou sistemas adequados ao uso de não programadores. Na animação computacional existe um desafio tantalizante: a especificação de movimento em baixo nível pode ser extremamente trabalhosa, principalmente se o objeto a ser animado tiver muitos graus de liberdade, contudo, esta técnica dá espaço para o animador mostrar sua criatividade; por outro lado, especificações de alto nível são de fácil emprego por artistas, mas apresentam resultados não muito propícios a liberdade artística, e requerem muito mais recursos do sistema que é disponibilizado ao usuário: da interface aos recursos técnicos de controle da animação. Isso serviu de motivação para o desenvolvimento de simulações simples nos cursos de Computação Gráfica do IC/UFF. Este trabalho apresenta os fundamentos utilizáveis nos sistemas que buscam trazer ao dia a dia da computação os processos relacionados a criação de imagens móveis.

### 2. PALAVRAS CHAVES

Imagens móveis, cinemática direta, cinemática inversa, dinâmica das mudanças.

### 3. INTRODUÇÃO

Os cientistas, de há muito, aprenderam que a visualização das leis de variação dos fenômenos naturais ou sociais fornece um poderosíssimo meio de compreensão desses fenômenos. Por sua vez as leis de variação dos fenômenos, quando ainda não totalmente conhecidas, são intuídas e estudadas mais facilmente quando se pode acompanhar a evolução desses fenômenos por meio de imagens. As imagens móveis vem sendo exaustivamente utilizada na aceleração de processos. Processos lentos tais como o crescimento das plantas, dos animais, das colônias de insetos, por exemplo, são amostrados a intervalos de tempo relativamente grandes (dias, semanas ou meses) e exibidos em rápida seqüência, dando uma idéia mais adequada deste desenvolvimento. Para o crescimento das plantas, imagens tomadas a cada 24 horas são exibidas à razão de 25 imagens por segundo. A dinâmica das mudanças se revela facilmente quando acelerada 2.160.000 vezes.

Em Medicina, elas podem ter aplicações na simulação de cirurgia, no ensino de anatomia, na simulação de implantes de próteses em ortopedia e cirurgia plástica, em planejamento de tratamento fisioterápico, entre outras. Nesse contexto, é muito útil o desenvolvendo de algoritmos que possam servir como soluções para os problemas de visualização e simulação do movimento de pacientes virtuais, onde um dos maiores desafios é a simulação anatômica do movimento articulado. Juntas ou articulações são a união entre dois ou mais ossos, estando localizadas nas extremidades dos mesmos, onde os ossos participantes estão em contato uns com os outros e onde pode ocorrer o movimento. O esqueleto humano é formado por cerca de 200 ossos conectados uns aos outros por articulações. Nas juntas móveis, o movimento ocorre em torno de um ou mais eixos[1].

A evolução dos equipamentos vem possibilitando usar o computador para gerar imagens de sistemas em movimento nas mais diversas áreas do conhecimento. Para permitir a passagem da animação por computador das mãos dos programadores para as mãos da comunidade artística é necessário o desenvolvimento de

ferramentas de alto nível ou sistemas adequados ao uso de não programadores. Na animação computacional existe um desafio tantalizante (de *Tantalus* rei lendário de *Phrygia*, que foi condenado a permanecer submerso em água cercado de ramos de frutos mas sempre que tentasse beber a água ou comer algum fruto esses saíam de seu alcance). Esse desafio é descrever as especificações do movimento em nível adequado ao artista e ao programador, para não tornar inatingível ou extremamente trabalhoso ao artista mostrar sua criatividade e por outro lado ao programador e implementador especificar adequadamente os recursos do sistema que serão disponibilizado ao usuário na interface para controle da animação. Este trabalho apresenta os fundamentos utilizáveis nos sistemas que buscam ajudar a resolver esse desafio pelo lado dos aspectos de computação relacionados a criação de imagens móveis.

#### **4. REVISANDO OS TRABALHOS MAIS IMPORTANTES.**

A utilização regular da imagem móvel é bastante recente, só aparecendo depois da criação do filme fotográfico. Esforços preliminares foram desenvolvidos no século 19 quanto foi descoberta a persistência da visão, o que deu origem a dispositivos rotativos, como o “zoetrope” e o bloco de desenhos dobráveis “flipbook”. Em 1890 Meileis utilizou truques de câmera para objetos inanimados apresentarem movimento. As vinhetas de Emile Cohl e as cenas de Stuart Black foram iniciativas pioneiras no raiar do século 20. O primeiro desenho animado é de Winsor McCay e foi produzido em 1906. Em 1910 John Bray iniciou o uso de técnicas novas como o uso de celulóide e tons de cinza. Na década de 1920 apareceram o som e na animação os estúdios Walt Disney (“Steamboat Willie” em 1928) [5]. Uma experiência notável, na área de imagens móveis, foi um livro (“The Restless Universe”) publicado pelo físico Max Born, em 1935 [17]. Neste livro as margens das páginas são largas e nelas são exibidas figuras, como elas em páginas sucessivas apresentam pequenas diferenças, quando são folhadas rapidamente se obtém a ilusão de movimento das imagens (um “flipbook”[1]). Ao longo de 118 quadros são explicados fenômenos de difícil concepção tais como a dualidade partícula/onda na teoria atômica. Assim, por exemplo, em uma margem de página surgem um oscilador hertziano, uma distribuição de partículas  $\alpha$ , o movimento do elétron do átomo de hidrogênio com a rotação do plano orbital no qual o movimento do elétron está contido. A produção foi extraordinária e o resultado é altamente dependente da habilidade do leitor em manusear rápida e continuamente as margens das páginas.

Em 1954 a Shell Film Unit produziu o filme “The Gas Turbine” que mostrava o funcionamento de uma turbina a gás. Foi produzido a partir de peças reais de turbinas, utilizadas como cenário, sobre o qual partículas e linhas de fluxo são animadas pelo desenho em células transparentes superpostas (em celulóide, tal como desenvolvido por Walt Disney) [5]. Na década de 60 do século XX, passou-se a utilizar a técnica “caligráfica”. Por esta técnica ao tratar-se de uma equação que governa um fenômeno, a determinados intervalos de tempo, dirige-se para um dispositivo de saída (vídeo ou traçador de gráficos) o valor amostrado. O traçado de linhas entre os pontos exibidos mostra a lei de variação do fenômeno amostrado. Um trabalho pioneiro dos laboratórios Bell, publicado em New Scientist, se hoje em dia, parece trivial, foi considerado marco relevante na época. Nele as imagens eram geradas por uma listagem contendo a posição de um determinado satélite em sucessivos intervalos de tempo. Este é um caso clássico de visualização de movimentos em ciência e que foi executado por programas de computador escritos em FORTRAN. Caso se desejasse visualizar o movimento desse satélite supunha-se que o mesmo estivesse envolvido por uma caixa (“bounding box”) e, então, examinasse as posições sucessivas dessa caixa por meio de visão em perspectiva. Considerando que a Terra gira e que se deseje visualizar as órbitas do satélite em foco, a visualização do movimento das primeiras órbitas do satélite poderia ser feita criando um programa de computador para ler a listagem, registrando a posição do satélite em intervalos regulares e desenhando a perspectiva do paralelepípedo envolvente do satélite. Considerando que este procedimento poderiam congestionar a tela (ou traçador de gráficos) pela existência de imagens demasiadamente próximas umas das outras, exibe-se apenas uma perspectiva de paralelepípedo para cada uma de cinco amostras consecutivas.

#### **5. FORMAS DE ANIMAÇÕES**

A animação cinematográfica utiliza não só o computador como também diversas possibilidades de desenhos, marionetes, a animação de argila e a animação de areia. A produção de uma animação compreende diversas atividades:

- Apresentação – é o conjunto em produção, ou seja, toda a animação.
- Ato – é o episódio principal da animação e usualmente identificado por uma área de ação. Uma apresentação usualmente possui de um a doze atos. Os atos são divididos em cenas.
- Cena – é a identificação de um local de ação contínua. Uma cena é dividida em uma ou mais tomadas.
- Tomada – é uma seqüência de gravação ininterrupta de câmera. Uma tomada é dividida em quadros individuais de filme.
- Quadro – é cada uma das imagens armazenadas em uma porção de filme.

A semente da produção de uma animação tradicional é feita pela filmagem dos quadros desenhados (“cartoons”), de modo que a produção tradicional da animação segue o seguinte esquema [34]:

- Escolha de uma história preliminar.
- Desenvolvimento de um "storyboard" que mostra as cenas de ação exibindo quadros representativos e estabelece uma explicação do conteúdo.
- Detalhamento da ação.
- Identificação dos “key frames” e sua produção pelos animadores de mais alta técnica para confirmar o desenvolvimento dos personagens e a qualidade das imagens.
- Teste de câmera para ver em uma pequena seqüência a cor, a renderização e as técnicas de movimento.
- Elaboração dos desenhos intermediários entre os “key frames”, feita por desenhistas auxiliares (desenhos esses chamados de “in-betweening”).
- Passagem dos desenhos dos quadros do papel para células transparentes (“inking”).
- Colorização, que é a pintura das células.

A animação por computador teve origem na Universidade de Utah, sob o projeto DARPA com o sistema SketchPad desenvolvido por Ivan Sutherland. No final da década de sessenta do século passado, destacou-se Chuck Csuri, da Universidade de Ohio. Diversas universidades norte americanas e a Universidade de Toronto também se destacaram na animação por computador. Empresas tais como Pixar, Industrial Light and Magic, Pacific Data Images, Disney e outras apresentam vigorosa atividade em animação por computador [5].

## 6. TÉCNICAS DE CONTROLE DA ANIMAÇÃO POR COMPUTADOR

Embora possa haver diversas classificações, pode-se apresentar as seguintes formas de animação por computador: (1) animação de corpo rígido; (2) animação de estruturas articuladas; (3) animação procedimental (como animação de partículas, por fractais); e (4) animação comportamental.

### ***Animação de corpo rígido***

Na forma de animação mais simples com o uso de computação, a animação de corpo rígido, o objeto em movimento mantém sua forma apenas mudando de posição [32]. Esta técnica foi a pioneira e permanecerá durante bastante tempo em uso pois é a preferencial dos usuários que não possuem uma base formal em computação ou programação [33]. O problema fundamental consiste na especificação do movimento, ou seja, como fazer mover o objeto **A** de sua posição corrente para a posição **X**. Uma idéia inicial foi imitar o processo de "in-betweening" da animação cinematográfica, o que corresponde a efetuar uma interpolação matemática. O re-uso de movimentos também é um aspecto relevante pois pode reduzir substancialmente o esforço despendido.

A interface utilizada para a determinação dos pontos intermediários é um problema de difícil solução. Pode-se utilizar "scripts" para especificar o movimento, que podem ser descritos por curvas paramétricas cúbicas sobre as quais se mova um ponto de referência. Pelo chamado método da dupla interpolação são utilizadas duas curvas, sendo uma para a trajetória do objeto no espaço e a outra para as características do movimento ao longo da trajetória, assim pode-se alterar independentemente qualquer uma delas. Uma interface adequada para mostrar os detalhes de uma animação por computação gráfica é composta de cinco janelas: uma para a curva de movimento; três para as projeções da curva de movimento nos planos **xy**, **yz** e **xz**, e uma para a curva de velocidade. A figura 1 mostra essas janelas.

A geração de uma animação por esse método utiliza uma curva de movimento  $Q(u)$  e uma curva de velocidade  $V(u)$ . O animador verifica o resultado e pode editar quaisquer das curvas para obter melhores resultados. O processo de geração consiste na derivação da posição do objeto a intervalos igualmente espaçados no tempo, da forma descritas pelos passos:

1. Para um quadro, no tempo  $t$ , encontre a distância  $s$ , à partir de  $V(u)$ , correspondente ao tempo  $t$  do quadro.
2. Encontre o valor correspondente de  $u$ , medindo  $s$  unidades ao longo da trajetória  $Q(u)$ .
3. Substitua o valor de  $u$  na equação de  $Q(u)$  para encontrar a posição do objeto  $(x,y,z)$ .
4. Desenhe, projete e tonalize adequadamente ("renderize") o objeto nessa posição.

Este processo esconde a re-parametrização, pois  $V$  é parametrizado em função de  $u$ .  $V(u) = (t,s) \quad T = T(u) \quad S = S(u)$ . Dado o tempo  $t_f$  deve-se calcular  $u$  tal que  $t_f = T(u)$ . Substituindo este valor de  $u$  em  $s = S(u)$  pode-se desenhar sobre a curva característica  $Q(u)$ . Mas  $Q(u)$  é parametrizada em  $u$  e não em  $s$ . É preciso, portanto inverter duas equações (figura 2):  $U = T^{-1}(t) \quad U = Q^{-1}(s)$

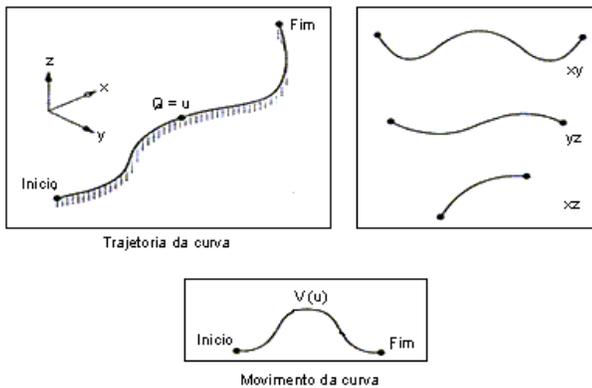


Figura 1 - Especificação de movimento para animação de corpo rígido.

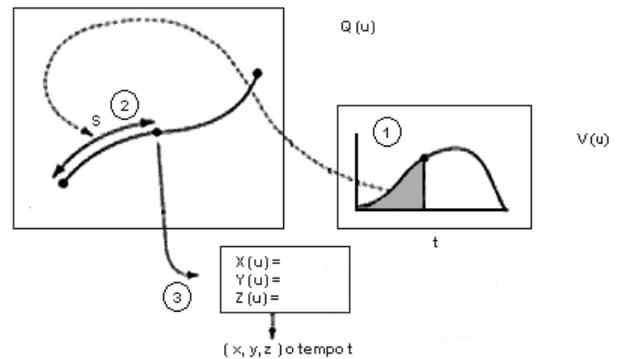


Figura 2 - Busca da posição do objeto (x,y,z) no tempo t.

Um método aproximado (que, dado  $t$  ou  $s$  encontra um valor próximo de  $u$ ) é o do cálculo do comprimento acumulado de corda, cujo algoritmo é o seguinte:

*Construa uma tabela de comprimentos acumulados de cordas tomando pequenos intervalos em  $u$ , calculando as distâncias:  $l_1, l_2, l_3, \dots$  e inserindo na tabela  $l_1, (l_1+l_2), (l_1+l_2+l_3)$ , os comprimentos acumulados.*

*Para encontrar o valor de  $u$  correspondendo a  $s$  escolhe-se o valor da tabela mais próximo de  $s$ .*

Este algoritmo não é dos melhores mas fornece um ponto de partida para melhoramentos dependentes do contexto. Existem situações particulares nas quais, por exemplo, deseja-se fazer com que uma animação tenha uma duração perfeitamente determinada. Caso a velocidade de movimento fosse constante e a trajetória fosse editada haveria discrepância. Assim o contexto pode introduzir uma restrição de duração fixa provocando ajustamentos na velocidade toda vez que editar a trajetória ou vice versa.

Um problema a encarar é a "atitude" (termo usado em atividades aeronáuticas e espaciais para especificar uma posição determinada pela relação de seus eixos com os eixos de um referencial) do objeto, já que ele não é apenas um ponto de referência (ou centro de gravidade). A atitude do objeto é influenciada pela rotação. Pode-se incluir "scripts" de curvas de rotações em torno dos três eixos coordenados rigidamente ligados ao objeto em movimento. Parametriza-se a rotação pelos chamados ângulos de Euler ou "roll", "pitch" e "yaw".

Eventuais colisões de objetos representam problema de muito difícil tratamento quando existem diversos objetos animados em uma cena. Suponha-se dois objetos compostos de malhas de polígonos cada qual contendo grande número de polígonos. Para verificar se um vértice de um polígono se moveu para dentro do espaço de outro objeto há necessidade de comparar a posição do vértice com cada polígono do outro objeto. Este

procedimento é extremamente consumidor de tempo de computação. Além de tudo resta resolver qual vai o ser o comportamento dos objetos depois da colisão (se houver) [37].

### Animação de estruturas articuladas

Nesta forma de animação também chamada de animação esquelética, a determinação da posição de um ponto desejado, como por exemplo, o efetuador de um robô ou a extremidade de uma estrutura articulada, é feita pelos chamados processos de cinemática direta e cinemática inversa. Na **cinemática direta** são especificados os ângulos de todas as juntas da estrutura que, em conseqüência, determinarão unicamente as coordenadas do ponto extremo da estrutura. No processo de **cinemática inversa** é especificada a posição do ponto extremo da estrutura e calculados os ângulos das juntas que permitam o cumprimento da especificação. A figura 3 ilustra a cinemática direta e a figura 4 ilustra a cinemática inversa. Na figura 5 é exibido um exemplo de equação relacionando a posição do ponto extremo de uma estrutura com os ângulos de suas juntas.

Denavit e Hartenberg [25] descreveram relacionamentos translacionais e rotacionais entre peças articuladas adjacentes para manipuladores mecânicos. Eles usaram um método matricial, que estabelece um sistema de coordenadas para cada junta da estrutura. Matrizes de transformação entre esses sistemas de coordenadas são criadas e associadas às respectivas articulações. Basicamente, as matrizes de transformação possuem quatro parâmetros a partir dos quais é construída a matriz  $A$ , representando as quatro transformações homogêneas que relacionam o sistema de coordenadas da junta ( $i$ ) com o sistema de coordenadas da junta ( $i-1$ ). Este esquema, proposto para sistemas mecânicos de robótica é eficaz e econômico na modelagem de diversos tipos de estruturas articuladas.

O processo usado na cinemática direta é muito trabalhoso, pois exige a especificação de um grande número de parâmetros, embora proporcione um controle preciso da estrutura. O processo inverso é mais intuitivo, pois os usuários das aplicações desejam especificar a posição do ponto desejado, sendo os ângulos das juntas considerados mero subprodutos. Além disso, o número de parâmetros sendo menor, permite maior eficiência de projeto ao custo de perda parcial de controle sobre as partes intermediárias da estrutura[31].

Para a cinemática inversa, o cálculo dos ângulos é feito com o auxílio do Jacobiano. Dado  $\mathbf{X} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})$ ,  $X^{n \times 1}$ ,  $\theta^{m \times 1}$ , o Jacobiano é a matriz  $n \times m$  de derivadas parciais que relaciona a diferencial de  $\mathbf{x}$  com a diferencial de  $\boldsymbol{\theta}$ :

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad \text{onde} \quad \mathbf{J} \equiv \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \quad \text{e} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{x}}$$

O Jacobiano relaciona linearmente os movimentos do efetuador com os movimentos angulares das juntas. Para o exemplo com três barras se obtém:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{\theta}) \\ f_2(\boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial f_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 & -l_3 \sin \theta_3 \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_2 & l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix}$$

Usualmente o que se deseja é calcular  $\boldsymbol{\theta}$ , a partir de  $\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{x}}$ . Como  $\mathbf{J}$  não é necessariamente quadrada, sua inversa deve ser substituída por sua *pseudo inversa*, o que configura a solução geral  $\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1}$ , ao lado da solução normal  $\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ . Assim:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{solução normal mínima}) \quad \text{ou} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (\text{solução geral})$$

Em diversas aplicações, é comum encontrar uma matriz singular. Neste caso não existe solução única e a solução do sistema deve ser obtida por métodos numéricos como a *Decomposição de Valores Singulares* (SVD) da matriz  $\mathbf{J}^{N \times M}$ . A SVD é a transformação da matriz  $\mathbf{J}$  em três matrizes como:  $\mathbf{J} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Sigma} \mathbf{\Lambda}^T$ , onde  $\mathbf{\Gamma} \in R^{N \times N}$  e

$\Lambda \in R^{M \times M}$  são matrizes ortogonais e  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M) \in R^{N \times M}$  é uma matriz diagonal onde  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$  são os *valores singulares* de  $\mathbf{J}$ .

A SVD é uma decomposição útil, uma vez que permite o cálculo da solução do sistema para problemas de posto deficiente e ainda informa o condicionamento da matriz  $\mathbf{J}$ . Escrevendo  $\Gamma = [\gamma_1 \dots \gamma_N]$  e  $\Lambda = [\lambda_1 \dots \lambda_M]$ , onde  $\gamma_i$  e  $\lambda_i$  são respectivamente as colunas de  $\Gamma$  e  $\Lambda$ , a solução do sistema é calculada

como:

$$\theta_j = \sum_{i=1}^r \frac{\gamma_i^T x_j}{\sigma_i} \lambda_i$$

onde  $\theta_j$  é a coluna  $j$  da matriz  $\Theta$ ;  $r = \text{rank}(\mathbf{J})$  é o posto da matriz  $\mathbf{J}$  e  $x_j$  é a coluna  $j$  da matriz  $\mathbf{x}$ . O cálculo da pseudo inversa pode ser feito por eliminação Gaussiana ou por decomposição de valores singulares  $\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ ,

sendo  $\mathbf{J} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$   
 $\mathbf{J}^+ = \mathbf{V}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^T$ . Os ângulos são obtido de  $\theta(t) = \int \dot{\theta}(t) dt = \int \mathbf{J}^+(t) \dot{\mathbf{x}}(t) dt$

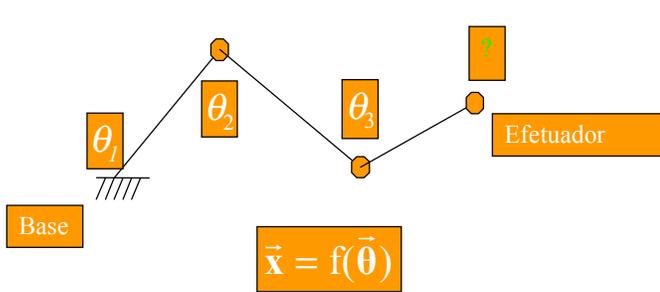


Figura 3 - Na Cinemática Direta calcula-se a posição final pela combinação dos deslocamentos.

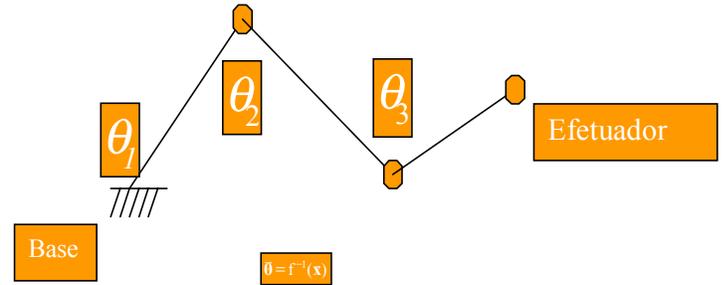
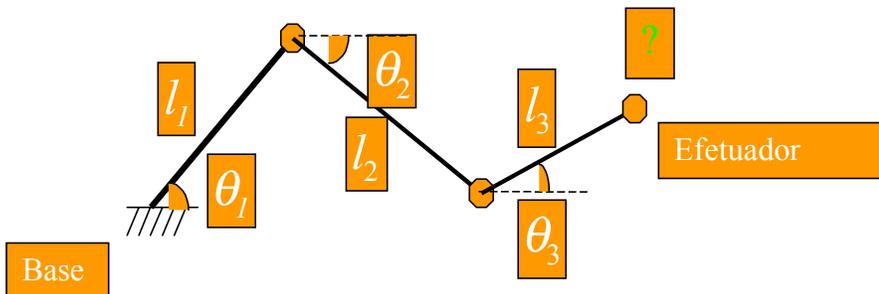


Figura 4 - Na cinemática Inversa, dada a posição final calcula-se que deslocamento cada uma das partes deve sofrer para que se chegue à posição final



$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_3)$$

Figura 5 - Equações relacionando a posição do ponto extremo de uma estrutura com os ângulos de suas juntas.

É interessante observar que estruturas articuladas também se fazem presente na modelagem do corpo humano ou dos chamados modelos humanos virtuais [24]. Entretanto, percebe-se que na modelagem da topologia articular de um corpo humano estão presentes características que fazem emergir algumas desvantagens na utilização da notação de Denavit e Hartenberg [25]. O problema mais crítico é a dificuldade de representar estruturas com ramificações, algo tão presente no corpo humano. Além disso, a necessidade da notação de manter um dos extremos da cadeia articulada fixo, limita ainda mais o escopo de aplicações dessa representação. O esquema Axis-Position Joint, ou APJ [26], armazena a posição da articulação com a orientação do seu sistema de coordenadas e ponteiros para os segmentos conectados pela articulação. Assim, permite estruturas articuladas ramificadas e com vários graus de liberdade. Entretanto, este esquema não relaciona as juntas hierarquicamente. Numa extensão da APJ [27] foram incluídos mais três parâmetros ao modelo para que a orientação do sistema de coordenadas de uma junta seja dada em relação a sua junta imediatamente superior na hierarquia. Nesse modelo hierárquico, a posição de cada articulação é definida através da composição em

seqüência das matrizes de transformação das articulações anteriores. Desta forma, apenas a primeira articulação da estrutura precisa ser posicionada no espaço, enquanto que o restante dela é controlado pela variação do ângulo entre as articulações. No esquema de hierarquia para modelos humanos articulados denominado H3D (Hierarchy 3D) [28], cada junta representa um único grau de liberdade translacional ou rotacional. Com isso, para construir uma articulação como a do punho humano, por exemplo, com dois graus de liberdade, são necessárias duas juntas, subordinando uma a outra. As juntas carregam consigo matrizes homogêneas que representam suas relações com a sua junta pai na hierarquia e com a junta raiz do modelo, bem como as suas inversas e outras relações necessárias durante os processos de edição e simulação. Monheit e Badler [29] apresentaram modelos para a coluna e o tronco. Seu trabalho foi baseado em pesquisa da anatomia da coluna vertebral humana, assim, tamanhos das vértebras e discos intervertebrais, amplitudes e direções do movimento entre cada par de juntas, e posição de repouso para a coluna foram obtidas a partir de medidas anatômicas. Além disso, a participação dos grupos de músculos e ligamentos complexos da coluna foi considerada na modelagem, permitindo que as forças de tração e resistência existentes na coluna humana fossem representadas. As articulações entre cada vértebra foram modeladas permitindo três graus de liberdade de movimento definidos em três eixos de rotação. Os modelos foram testados e visualizados no Jack, o sistema de software desenvolvido na Universidade da Pensilvânia para modelagem e manipulação de figuras humanas [30].

Nos deslocamentos de corpo rígido usam-se "scripts" registrando as transformações de valores, por meio de uma curva que indica o movimento do ponto de referência da estrutura. Quando se usa cinemática direta usam-se diversos "scripts", um para cada uma das partes da estrutura (ou juntas). Para obter um movimento desejado o animador inicia no topo da hierarquia ou raiz da parte móvel e vai descendo, aplicando os "scripts" a cada nível, como se pode ver na figura 6

### ***Animação procedimental (ou por sistemas de partículas, fractais, L-systems)***

A animação procedimental é aquela na qual o comportamento das imagens em movimento é regulado por um modelo matemático, expresso em forma de procedimento [38]. O modelo matemático normalmente retrata uma simulação física ou processos naturais tais como campos gravitacionais ou magnéticos. Um dos exemplos mais representativos desta categoria é o de animação por sistemas de partículas.

Uma partícula é uma primitiva de dimensões diminutas, ou nulas, podendo projetar-se em um único pixel. Cada uma das partículas é animada por um script e o movimento de seu conjunto é exibido como uma nuvem que pode crescer, encolher, deslocar-se, mudar de forma, etc. Como essas animações, podem envolver até milhares de partículas seus "scripts" são os mesmos, diferindo apenas de parâmetros aleatórios para individualizar cada partícula. Quando a animação estiver retratando fogos de artifícios, por exemplo, o "script" básico das partículas é uma parábola. A individualização das trajetórias pode ser obtida variando, para cada parábola, os parâmetros: ponto de partida, apogeu da trajetória, cor da partícula (que pode variar ao longo do curso) e tempo de vida. Tanto o aspecto dinâmico, quanto à aparência de cada partícula, podem ser especificados pelo mesmo "script". Um "script" pode envolver mais de uma ação do mundo natural. Ao modelar uma explosão, as partículas lançadas para cima pela explosão sofrem a ação da gravidade e os efeitos têm de ser combinados. Em um segundo nível de abstração, pode-se modelar as nuvens de partículas como objetos sólidos, por sua vez também animados, como foi feito no filme "O abismo".

A modelagem fractal em especial os chamados L-systemas [22] são também muito usados para a criação de imagens e animações complexas. Uma das seqüências de animações mais conhecidas usando a teoria do caos e fractais é a da geração de um planeta com sua flora e fauna, pelo sistema "Genesys" no filme "A Ira de Kahn" da primeira geração da série cult "Jornada nas Estrelas" (Star Trek II) [39].

### ***Animação comportamental***

Animação comportamental é um caso particular da animação procedimental, que consiste em considerar partículas evoluindo para entidades mais complexas, que tem interação com as demais partículas, tomando consciência, tendo tendências e colisões, como ocorre nos bandos de pássaros ou nos cardumes. Um estouro de manada pode, por exemplo ser modelado usando, regras (restrições) como: (1) deve-se evitar colisões com os elementos vizinhos; (2) deve-se procurar ajustar a própria velocidade a velocidade média de seus vizinhos; e (3) deve-se procurar não se desgarrar do conjunto mantendo-se próximo do centro do bando.

Um destes modelos é o de Tu e Terzopoulos é citado na referência [1]. Onde para modelar um cardume, foi inicialmente modelado um peixe por meio de um sistema massa-mola, contendo 23 nós interconectados por 91 molas. O modelo de peixe possui músculos, cauda direcional, sensores de vizinhança, gerador de intenções, rotinas de comportamento. O modelo de deslocamento comporta rotações nos três eixos (“roll”, “pitch” e “yaw”) e pode ser visto na figura 7.

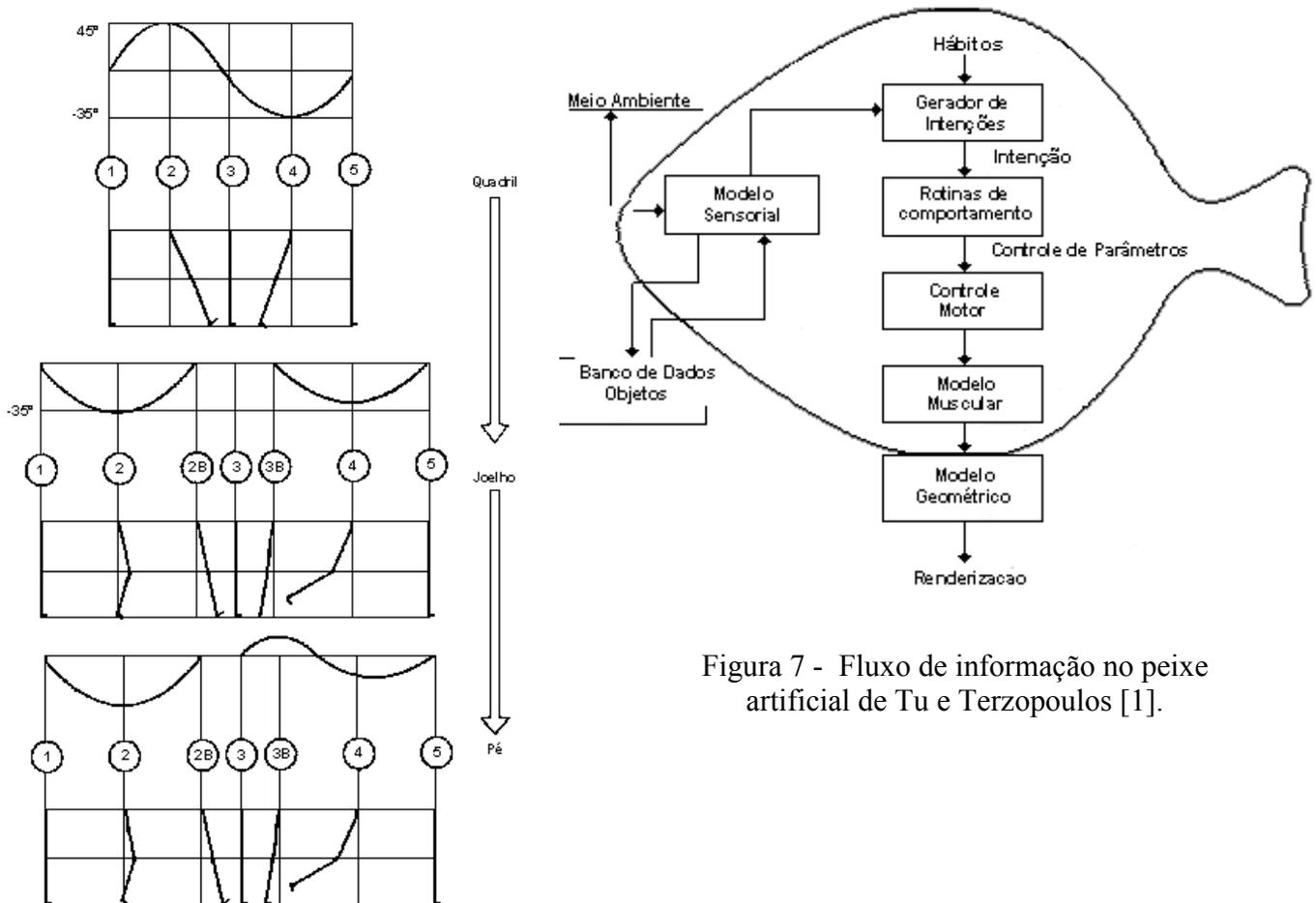


Figura 6- Evolução de um script para uma perna.

Figura 7 - Fluxo de informação no peixe artificial de Tu e Terzopoulos [1].

## 7. MODELOS DE CONTROLE DA SIMULAÇÃO

A animação pode basear-se em dois tipos de modelos distintos. O primeiro deles consiste na animação baseada em modelos físicos e o segundo usa técnicas de simulação visual. As técnicas anteriores de animação levaram em conta que a produção podia ser extremamente demorada, enquanto a exibição da cena ser bastante curta. Quando se desejar utilizar aplicações de realidade virtual, isso não mais será verdade, pois haverá necessidade de aplicações em tempo real. A tecnologia atual (de 2003) ainda não permite a geração de quadros modelados em tempo inferior a 20 ms, pois se baseia na computação gráfica estática. O uso de malhas de polígonos, representando os objetos é pouco eficiente para representar objetos que mostram complexas mudanças de forma. A modelagem que parece emergir não é única apresentando diferentes soluções para casos distintos. As técnicas de visualização abandonam o estudo das forças naturais que modelam o movimento para enfatizar o aspecto visual. Este tipo de técnicas vem sendo empregado particularmente na animação facial e na simulação do movimento de tecidos [36,38]. A animação facial é feita em diversos níveis. Em um nível geométrico define-se uma rede de elementos poliédricos modelando a face, rede essa que pode ser deformada pela ação dos músculos. Em um nível física, tem-se uma aproximação do comportamento dos tecidos por um

modelo de reticulado de pontos de massa interligados por molas não lineares. Em um nível muscular, faz-se a simulação do deslocamento de pontos da face pela contração dos músculos acionados pelo nível de controle, que trata da tradução de uma expressão em ação coordenada de grupos de atuadores do modelo facial. Em um nível de expressão, último nível (superior da hierarquia) definem-se expressões primárias, cada qual com diversos níveis de ênfase [38]. Para enfrentar o problema da animação, como um todo, pode-se usar uma combinação de técnicas. O corpo humano pode ser modelado considerando o esqueleto como uma estrutura articulada, o movimento dos membros governado procedimentalmente pelo comportamento de músculos e a pele modelada por técnicas exclusivamente visuais.

## 8. CONCLUSÕES

Modelos de baseados em quadro-chaves e morphing já foram implementados em diversos trabalhos anteriores [31-36]. Formas de animação facial foram implementados dentro de nossa linha de pesquisa de auxílio a fala de deficientes auditivos [38]. Na atual etapa do trabalho, está sendo implementado exemplos animação de corpo rígido e de estruturas articuladas com cinemática direta. No decorrer das próximas semanas espera-se poder disponibilizar estes exemplos em uma página na internet (<http://www.ic.uff.br/~aconci/CG3.html> e <http://ic.uff.br/~ferraz>). Quanto a essa técnicas poderíamos concluir salientando que na cinemática inversa, adota-se uma abordagem de mais alto nível, cabendo ao animador especificar pontos iniciais e finais de cada movimento, além da velocidade desejada. O animador não controla todos os movimentos da estrutura com a mesma precisão e podem ocorrer diversas soluções para a mesma especificação. Na prática a cinemática direta, obriga o animador a trabalhar demais e a cinemática inversa pode se tornar computacionalmente intratável para estruturas complexas. Uma maneira de contornar as limitações do processo cinemático vem sendo empregada com sucesso em robótica. Consiste em um operador humano acionar o robô movimentando o ponto final (efetuador). O registro dos movimentos feitos por um operador treinado dá origem a um script sem explicita geração de instruções. Isto pode ser usado na captura do movimento de seres humanos (usando sensores) para gerar scripts de movimento para modelos computacionais [27].

## 9. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos dos cursos Computação Gráfica I e III , da graduação e pós-graduação, do Instituto de Computação da UFF pela motivação, pelas discussões sobre temas relacionados ao trabalho e pelas implementações de diversos exemplos de animação de corpo rígido e de estruturas articuladas com cinemática direta.

## 10. REFERENCIAS

- [1] A. H. Watt, F. Policarpo, The Computer Image , Addison-Wesley Pub Co (Net); 1998.
- [2] G. Jonas e L. Velho, L., Computação Gráfica: Imagem , IMPA/SBM , Rio de Janeiro , 1994.
- [3] F.L.Bookstein, Thin Plate Splines and the Atlas Problem for Biomedical Images, Information Processing in Medical Imaging, 12th International Conference, IPMI'91,Lecture Notes in Computer Science 511 (Colchester and Hawkes, eds) pp 326-342 , Springer-Verlag , Berlin , 1991.
- [4] T. Beier, e S. Neely, Feature based image metamorphosis , Proc. SIGGRAPH'92 , 35-42 , 1992.
- [5] R. Parent, Computer Animation: Algorithms and Techniques <http://www.cis.ohio-state.edu/~parent/book/outline.html>
- [6] L. Barinka, e R. Berka, Inverse Kinematics, Basic Methods <http://www.cg.tuwien.ac.at/studentwork/CESCG/CESCG-2002/LBarinka/>
- [7] [http://www.psu.edu/dept/cac/viz/sem\\_notes/animation/html/procedural.html](http://www.psu.edu/dept/cac/viz/sem_notes/animation/html/procedural.html)
- [8] <http://www.cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/animhtml/anim.html>
- [9] <http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/academic/class/15462/web.01s/notes/animation/sld038.htm>
- [10] S. Dorosh, Behavioural Dynamics and Animation of the Monarch Butterfly <http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~scdorosh/butterflies.html>
- [11] <http://www.multiliteracy.com/persist/animtypes.html>
- [12] <http://freespace.virgin.net/hugo.elias/models/mik.htm>

- [13] B. Baxter, Fast Numerical Methods for Inverse Kinematics, <http://www.cs.unc.edu/~baxter/courses/290/html/>
- [14] Inverse kinematics in lightwave <http://gdstudios.hypermart.net/art/tutorials/tutik.htm>
- [15] 3D Theory, Kinematics, Joints <http://www.martinb.com/physics/kinematics/joints/index.htm>
- [16] Kinematic, the study of motions without regard to the forces: [http://www.cc.gatech.edu/classes/AY2000/cs7496\\_spring/kinematics.pdf](http://www.cc.gatech.edu/classes/AY2000/cs7496_spring/kinematics.pdf)
- [17] M. Born, The Restless Universe, Dover Pub.; 2nd edition, June, 1951
- [18] <http://www.css.tayloru.edu/~btoll/s99/424/res/model/morph/morph.html>
- [19] <http://davis.wpi.edu/~matt/courses/morph/2d.htm>
- [20] <http://www.hammerhead.com/thad/morph.html>
- [21] <http://w3.impa.br/~zubelli/tutorial/node8.html>
- [22] K. Pulli, Computer Graphics - Winter, 2003. [http://www.ee.oulu.fi/cg\\_course/index.html](http://www.ee.oulu.fi/cg_course/index.html)
- [23] S. J. Hall. Biomecânica Básica. Ed. Guanabara Koogan, 1ª ed. 1991.
- [24] C. F. Arendi, T. P. Duarte. Princípios de Anatomia Humana. 1ª ed. Editora CI. 1996.
- [25] J. Denavit, R. S. A. Hartenberg. Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. ASME Journal of Applied Mechanics, pp. 215-221, Jun 1955.
- [26] D. Zeltzer, F. A. Sims. A Figure Editor and Gait Controller for Task Level Animation. In: Proceedings of Computer Graphics (SIGGRAPH'88). pp. 164-181. Course notes no. 4.
- [27] F. W. da Silva. Um Sistema de Animação Baseado em Movimento Capturado. Rio de Janeiro: LCG COPPE/UFRJ, 1998. (Dissertação de Mestrado).
- [28] R. Boulic, O. Renault. "3D Hierarchies for Animation". In: New Trends in Animation and Visualization, Edited by Nadia Thalmann and Daniel Thalmann, John Wiley & Sons Ltd., England, p. 59-77, 1991.
- [29] G. Monheit, N. Badler. A Kinematic Model of the Human Spine and Torso. IEEE Computer Graphics and Applications, V. 11, No.2, Mar 1991, pp. 29-38.
- [30] C. B. Phillips, N. Badler. Jack: A Toolkit for Manipulating Articulated Figures. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on User Interface Software. (pp. 221-229). New York, NY: ACM.
- [31] F.R. Leta, "Método dos Elementos Componentes para a Animação de Figuras Articuladas", DEM-PUC/RIO, 1992. (Dissertação de Mestrado).
- [32] C.B. Proença, "Um Sistema Integrado de Geração de Figuras e Animação por Quadro-Chaves Agrupados", DEM-PUC/RIO, 1993. (Dissertação de Mestrado).
- [33] J. H. Baldner, "Um Sistema de Animação Orientado para Cartoons", 1994, MAT-PUC-RIO. (Dissertação de Mestrado).
- [34] C.B. Proença, A. Conci, "Animação por quadros Chaves", Resumo das Comunicações do III ERMAC/RJ-ES (Encontro Regional da Sociedade de Matemática Aplicada e Computacional), Niterói, 1994.
- [35] C.B. Proença, "Um Sistema Integrado de Geração de Figuras e Animação por Quadros-Chaves Intermediários", Eng. Mecânica, 1993 - PUC-Rio. (Dissertação de Mestrado).
- [36] F. R. Leta, "Modelagem Matemática e Simulação Gráfica do Envelhecimento Facial Humano", PUC-Rio, 1998, (Tese de Doutorado).
- [37] F. Policarpo e A. Conci. "Real-Time Collision Detection and Response", Proc SIBGRAPI 2001, Florianópolis, SC. 2001, ISBN- 0-7685-1330-1. p. 376.
- [38] J.N. Ulysses, A. Conci "Speech Orientation Animation System to Disabled People" Proc. Sibgrapi 2002, p. 422, ISSN - 150-1843/02 - ISBN 0-7695-1846, Published by IEEE Comp.Society.
- [39] E. Azevedo, "Sistemas de partículas- parte II", Digital Designer, No. 52, p. 48-49, 2003.