

A MATEMÁTICA DA ANIMAÇÃO POR COMPUTADOR

Lançado em 1995, *Toy Story* foi o primeiro longa-metragem produzido inteiramente por computador. Desde então, o gênero se consolidou na indústria de entretenimento, recuperando a popularidade da era clássica dos desenhos animados. Em boa parte, esse sucesso se deve à espantosa evolução das tecnologias envolvidas nessa área multidisciplinar, que reúne ramos da matemática, das ciências da computação, da física, da percepção humana e da arte.

Como se faz um filme de animação por computador? Essa é basicamente a pergunta que este artigo pretende responder, dando ênfase à matemática envolvida nessa atividade.

Luiz Henrique de Figueiredo, Diego Nehab e Luiz Velho
Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (RJ)



Podemos dividir a produção de um filme em três etapas: planejamento, filmagem e edição. Assim, a partir do roteiro, inicialmente, são escolhidos atores, cenários e figurinos. Depois, todas as cenas são registradas para, finalmente, serem editadas nas sequências que compõem o filme.

Na animação por computador, essas etapas correspondem, respectivamente: i) à construção dos ambientes e personagens; ii) à especificação dos movimentos e da câmera; iii) à síntese das imagens (renderização).

As três etapas descritas acima constituem áreas básicas da computação gráfica, a saber: modelagem, renderização e animação. Elas são empregadas em praticamente todas as aplicações da computação visual, desde os jogos eletrônicos até a visualização científica.

A seguir, explicaremos, com mais detalhes, as técnicas dessas três áreas, bem como o uso de cada uma delas na produção de um filme por computador.

Personagens do filme *Toy Story*, primeiro longa-metragem produzido inteiramente por computador

>>>

DISNEY/PARAS STUDIOS



Aparando as arestas Para criar uma cena virtual no computador, precisamos representar matematicamente os objetos que a compõem. Como cada objeto tem uma forma geométrica e uma posição no mundo virtual, usamos o ramo da geometria conhecido como geometria analítica espacial, representando os objetos em relação a um sistema de coordenadas no mundo virtual.

Os objetos podem ter formas complexas e variadas que podem ser difíceis de representar diretamente. Por isso, usamos poliedros ou malhas poligonais (figura 1) como aproximações para a geometria dos objetos, transferindo, assim, objetos do mundo contínuo da matemática para o mundo discreto dos computadores.

Cada poliedro é representado pelo conjunto de suas faces. Os vértices de cada face são representados por suas coordenadas em relação ao sistema escolhido. Quanto maior o número de faces tiver o poliedro, melhor ele vai aproximar a superfície do objeto.

A matemática das aproximações de geometrias curvas por malhas de polígonos existe há mais de 100 anos, mas teve grande desenvolvimento com o advento de computadores poderosos devido às aplicações em engenharia e computação gráfica, principalmente nas últimas três décadas.

No contexto das aproximações geométricas, são particularmente importantes as técnicas de aproximação adaptativa, que permitem gerar malhas adaptadas à tarefa computacional do momento. Essas tarefas podem

ser a combinação ou o corte de objetos, a geração de imagens próximas à realidade (fotorrealistas) ou a detecção de colisão entre objetos em movimento. Como exemplo de técnica adaptativa, as partes de um objeto que estão visíveis ou estão mais perto da câmera precisam ser mais bem aproximadas do que as outras partes. Em particular, objetos que estão longe da câmera vão aparecer pequenos na imagem e, portanto, não precisam de aproximações muito detalhadas.

Uma técnica importante de aproximação geométrica é a de superfícies de subdivisão. Nela, a superfície de um objeto é definida como limite de um processo de refinamento das faces de uma malha poligonal inicial que captura, grosso modo, a forma do objeto final. Como o processo de refinamento não precisa ser feito em toda a malha, as superfícies de subdivisão permitem naturalmente refinamentos adaptativos.

A técnica de subdivisão já tinha sido estudada para aproximar curvas no plano, em 1947, pelo matemático francês Georges de Rham (1903-1990). Foi redescoberta, em 1974, pelo cientista da computação norte-americano George Chaikin (1944-2007), já no contexto de computação gráfica. Essa técnica, chamada corte de cantos, substitui cada vértice da malha poligonal por dois novos vértices, situados à mesma distância proporcional ao longo das arestas que chegam ao vértice. Quando aplicada a superfícies, o resultado é uma superfície de subdivisão (figura 2).

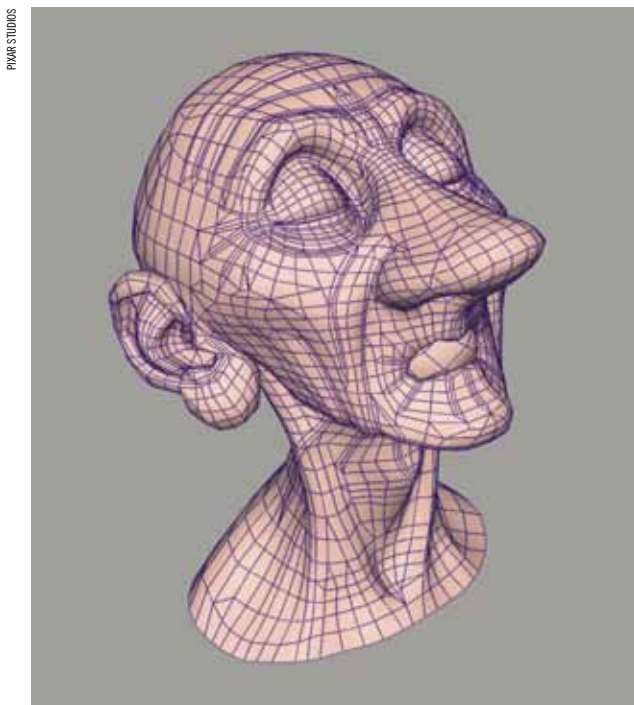


Figura 1. Exemplo de malha poligonal

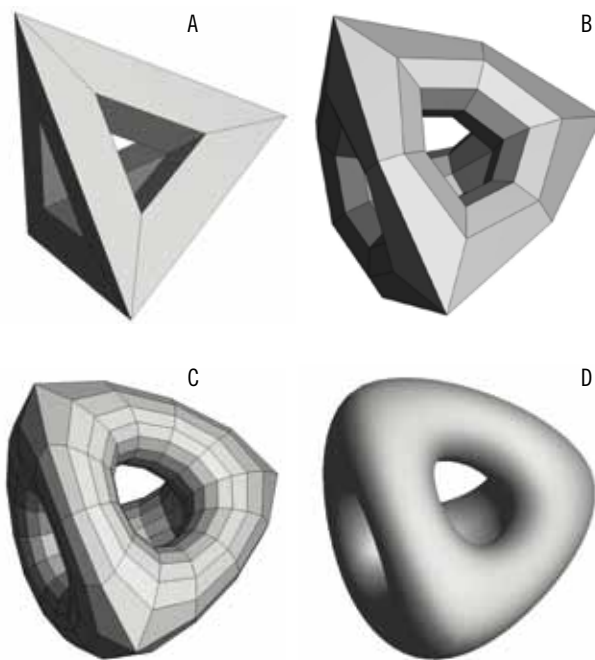


Figura 2. Em A, superfície a sofrer as subdivisões. Em B, depois de uma divisão. Em C, após duas subdivisões. Em D, a chamada superfície-limite

PIXAR STUDIOS

T. FERRE, M. ANSS, AND T. TRUONG, "SUBDIVISION SURFACES IN CHARACTER ANIMATION," ACM SIGGRAPH 1998

Figura 3. Geri, totalmente modelado com superfícies de subdivisão



DISNEY/PIXAR STUDIOS

DE CIENTISTAS A EXECUTIVOS

O termo superfícies de subdivisão de Catmull-Clark é referência a dois cientistas da computação: Edwin Catmull, que chefiou a divisão de computação gráfica da Lucasfilm, foi o principal coordenador técnico da Pixar e atualmente é presidente dos Walt Disney Animation Studios e dos Pixar Animation Studios. Jim Clark, que fundou as empresas SGI e a Netscape, recebeu um Oscar, em 2005, pelos avanços técnicos na indústria de animação.

A primeira e mais importante versão de superfícies de subdivisão foram as superfícies de subdivisão de Catmull-Clark (ver 'De cientistas a executivos'), propostas em 1978 e usadas em todas as animações por computador, como as da Pixar – e também tradicionais na indústria de CAD (projeto auxiliado por computador). Em 1998, a Pixar apresentou o curta Geri's Game [O jogo de Geri], totalmente modelado com superfícies de subdivisão (figura 3).

Da câmera para cena A criação de imagens fotorrealistas por computador é baseada na simulação dos processos físicos de formação de imagem que ocorrem na natureza. O ator principal desses processos é a luz que emana de fontes luminosas, como o Sol, e inunda a cena sendo capturada. Depois de refletida e refratada por todos os cantos, modulada e atenuada de diversas maneiras, a luz atinge o sensor de uma câmera digital. Cada uma dessas interações entre a luz e o ambiente altera a cor e a intensidade que finalmente são registradas pelas células sensíveis à luz (fotossensíveis) que cobrem o sensor.

Quanto mais precisa for a modelagem matemática desses processos, mais convincente será a ilusão de realismo. Infelizmente, não temos poder computacional suficiente para simular, na força bruta, todas as interações vivenciadas por cada fóton envolvido. Exemplo: uma lâmpada de 60 watts emite por volta de 10^{20} fótons por segundo. Tomando uma só lâmpada, um tempo de exposição de 1/60s, um supercomputador capaz de avaliar 1 bilhão (10^9) de interações por segundo e considerando apenas três interações por fóton, levaríamos mais de 150 anos para gerar uma única imagem. A produção de um filme inteiro, formado por centenas de milhares de quadros, seria impensável.

Por isso, um dos ramos de pesquisa mais ativos em computação gráfica se ocupa com a busca por técnicas que tornem viável a geração de imagens fotorrealistas convincentes. Dado um orçamento computacional finito, muitas estratégias priorizam as interações com maior impacto no resultado final. Outros métodos exploram a coerência espacial da cena para evitar que cálculos inúteis sejam realizados ou aqueles úteis sejam refeitos. Todos os sistemas profissionais de síntese de imagens adotam essas duas ideias amplamente.

Um dos métodos mais populares é o chamado traçado de raios, desenvolvido em 1980 por Turner Whitted. Já que uma parcela pequena dos raios emitidos pelas fontes de luz alcança a câmera, a ideia é traçá-los no sentido contrário: da câmera para a cena.

Uma versão probabilística do traçado de raios pode ser usada para simular efeitos de iluminação global, como a iluminação indireta e penumbras. Também consegue capturar efeitos de profundidade de campo (que leva em conta a lente e o diafragma da câmera), ambientes participativos (com névoa ou poeira no ar) e superfícies foscas ou com propriedades anisotrópicas (como metais ou tecidos).

Estratégias ainda mais sofisticadas são necessárias para a simulação de efeitos ópticos em que um raio de

>>>

luz sofre alterações, distorções, desvios etc. A incorporação de todos esses efeitos em imagens depende tanto de constantes avanços no poder dos computadores modernos quanto da criação de técnicas capazes de realizar os cálculos necessários, fazendo uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

Dar vida ao inanimado Animar significa dar vida a um mundo estático, inanimado. Para estudar a área de animação, vamos analisar dois aspectos: os tipos de animação – ‘o que’ está mudando com o tempo; e as técnicas de animação – ‘como’ essa mudança se realiza.

Na prática, diferentes conceitos dessa classificação são combinados para definir os processos de animação por computador. Pode-se perceber que a área é muito vasta e abrangente, com aplicações que vão da robótica à medicina. Para exemplificar seu uso nos filmes por computador, escolhemos focalizar na animação de personagens. Mais especificamente, vamos discutir a animação de faces, onde encontramos alguns dos maiores desafios da área e, ao mesmo tempo, tem fundamental importância na comunicação de uma história.

A animação da face de um personagem é particularmente difícil, pois estamos acostumados a ver e interpretar expressões faciais desde que nascemos. Portanto,

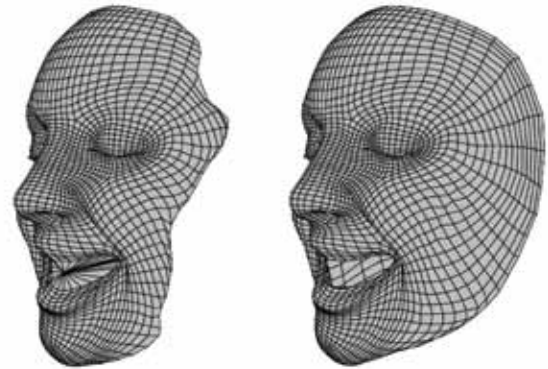


Figura 4. Exemplo de animação feita a partir de expressões-chave

identificamos imediatamente os mínimos defeitos na deformação dinâmica de um rosto. Esse fato – estudado em psicologia – sustenta a hipótese conhecida como ‘vale da estranheza’, segundo a qual, quanto mais realista é um rosto, mais exigentes somos para aceitá-lo como natural.

Assim, o primeiro critério a considerar na animação facial é a natureza do personagem, ou seja, o quanto ele



Figura 5. Emily Digital, baseada em técnica para dar fotorrealismo ao rosto humano

se aproxima do humano real. Temos, então, em um extremo, objetos que ganham vida, como a luminária do filme *Luxo Jr.*, e, em outro, réplicas virtuais de atores reais, como o herói Neo (Keanu Reeves) da série *Matrix*. O caso típico se situa em uma faixa intermediária que inclui os personagens caricaturizados, como o Woody de *Toy Story*.

O segundo critério a considerar é a técnica de animação, cuja escolha depende fortemente do tipo de personagem. Algumas técnicas são adequadas a personagens reais, enquanto outras a personagens caricaturizados. Para ilustrar, vamos mostrar dois conjuntos de técnicas, usadas, respectivamente, em efeitos especiais de cinema e em personagens de desenho animado.

Em efeitos especiais, muitas vezes, é necessário criar substitutos digitais para os atores reais, os chamados duplês virtuais. Nesse caso, para atingir o efeito desejado, tanto a animação quanto a modelagem e a iluminação devem refletir fielmente a realidade. Consequentemente, as técnicas usadas se baseiam na captura de dados: i) a geometria do rosto é digitalizada com um escâner 3D; ii) a iluminação emprega modelos de refletância (porção da luz refletida) da pele; e iii) a animação é feita a partir de expressões-chave obtidas do desempenho do próprio ator (figura 4).

Apesar de a simulação visual perfeita do rosto de uma pessoa real ser extremamente difícil, a tecnologia atual de computação gráfica já atinge resultados excelentes. Por exemplo, o pesquisador Paul Debevec, do Instituto de Tecnologias Criativas da Universidade do Sul da Califórnia (EUA), desenvolveu o projeto Digital Emily, no qual substitui o rosto da atriz britânica Emily O'Brien em um vídeo de forma indistinguível do original (figura 5).

No desenho animado, as técnicas são baseadas no trabalho de artistas. Assim, a geometria do rosto dos personagens é criada com programas de modelagem 3D, gerando, por exemplo, as malhas de superfícies de subdivisão. A animação é feita por controles semelhantes aos empregados na animação de marionetes. Esses controles manipulam 'pseudomúsculos', que estão associados a pontos de deformação na face. Expressões complexas, como um sorriso, deformam o rosto do personagem, combinando controles da boca, olhos etc. (figura 6).

Desafios Nos últimos 30 anos, progredimos desde ilustrações estáticas rudimentares até as animações fotorealistas, que permeiam praticamente todas as produções cinematográficas modernas.

Mesmo assim, ainda há grandes desafios pela frente, incluindo a modelagem realista de humanos virtuais, útil tanto para entretenimento quanto para treinamento médico; a síntese de imagens realistas em tempo real, com traçado de raios e iluminação global; e a construção de sistemas interativos intuitivos para simulações realistas, fisicamente corretas. **CH**

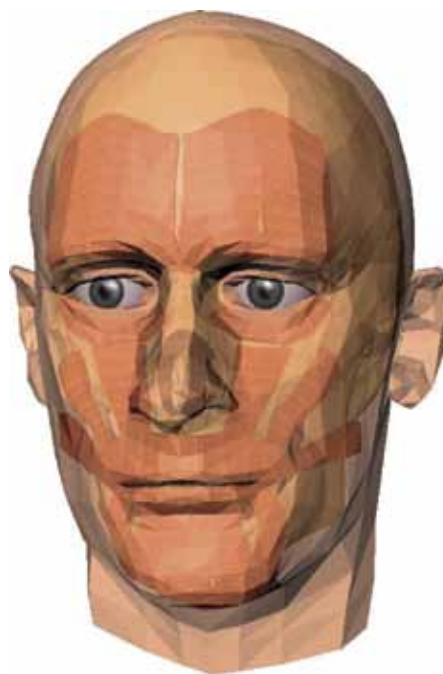


Figura 6. A manipulação de pseudomúsculos permite deformar o rosto para criar expressões complexas

LABORATÓRIO DEDICADO AO TEMA

A pesquisa em computação gráfica no Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), no Rio de Janeiro (RJ), é feita no Laboratório Visgraf, criado em 1989. É um dos grupos pioneiros em matemática aplicada à computação gráfica.

As pesquisas no Visgraf têm amplo espectro, incluindo todas as áreas de computação visual: modelagem geométrica, visualização, visão computacional, processamento de imagens, animação e novas interfaces.

Sugestões para leitura

- GOMES, J.; VELHO, L. *Fundamentos da computação gráfica*. Rio de Janeiro: IMPA (2003). Disponível em: <http://www.visgraf.impa.br/Publications/fundamentos/>
- PARENT, R. *Computer animation: algorithms and techniques*. Morgan Kaufmann (2012).
- PARKE, F. I.; WATERS, K. *Computer facial animation*. Natick: A K Peters (2008).
- WARREN, J.; WEIMER, H. *Subdivision methods for geometric design: a constructive approach*. Burlington: Morgan Kaufmann (2001).

NA INTERNET

- Visgraf (em inglês): www.visgraf.impa.br/
- Emily Digital (filme em inglês): <http://bit.ly/1EKqQT>
- Emily Digital (em inglês): <http://gl.ict.usc.edu/Research/DigitalEmily/>