

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

JONATAS DA CÂMARA MEDEIROS

**Construção de Ilustrações com Linhas de
Contorno**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em Ciência
da Computação

Profa. Dra. Carla Maria Dal Sasso Freitas
Orientadora

Porto Alegre, julho de 2009.

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Medeiros, Jonatas da Câmara

Construção de Ilustrações com Linhas de Contorno / Jonatas da Câmara Medeiros – Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Computação, 2009.

86 p.:il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação. Porto Alegre, BR – RS, 2009. Orientadora: Carla Maria Dal Sasso Freitas.

1. ABNT. 2. Visualização Ilustrativa. 3. NPR. 4. Princípios Perceptuais. 5. Interface baseada em esboço. 6. Computação Gráfica. 7. Ilustrações com Linhas. I. Freitas, Carla Maria Dal Sasso. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Aldo Bolten Lucion

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenador do PPGC: Prof. Álvaro Freitas Moreira

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio e aos amigos que sempre me deram força.

Agradeço a todos os colegas do grupo de computação gráfica pelas discussões e dicas que ajudaram na realização deste trabalho, em especial ao Chico pelas idéias inspiradoras.

Agradeço à minha orientadora, Carla Freitas, pela dedicação, motivação e principalmente por mostrar o caminho. Agradeço ao professor Mario Sousa pela grande colaboração e pelas idéias que tornaram possível este trabalho. Agradeço também ao professor Luiz Velho pelo apoio e incentivo.

Agradeço, finalmente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por ter financiado esta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contribuições do trabalho.....	19
1.2 Organização do texto.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Percepção visual.....	21
2.2 Princípios perceptuais em ilustração com linhas.....	24
2.2.1 Contraste entre preto e branco.....	25
2.2.2 Orientação.....	26
2.2.3 Linhas como formas.....	26
2.2.4 Linhas como bordas.....	30
2.2.5 Linhas como tons.....	30
2.2.6 Linhas e padrões.....	32
2.2.7 Linha de horizonte interno.....	34
2.3 Visualização Ilustrativa.....	36
2.3.1 Linhas de características.....	37
2.3.2 Linhas combinadas.....	38
2.3.3 Linhas de contorno.....	39
2.4 Comentários finais.....	44
3 VISÃO GERAL DO MÉTODO DESENVOLVIDO.....	47
3.1 Introdução.....	47
3.2 Processo de criação de ilustrações.....	47
3.3 Comentários finais.....	49
4 ESTRUTURAS GEOMÉTRICAS.....	53
4.1 Curvas de esboço.....	53
4.2 Curvas de seção.....	55
4.3 Linhas de contorno.....	57
4.4 Linhas de silhueta.....	59
4.5 Comentários finais.....	60

5	COMPOSIÇÃO DO <i>HATCHING</i>	61
5.1	Introdução	61
5.2	Definição de uma ROI	62
5.3	Criação das linhas	63
5.3.1	Cálculo das linhas dentro da ROI.....	64
5.3.2	Cálculo das linhas fora da ROI.....	65
5.3.3	Desenho da silhueta.....	66
5.4	Comentários finais	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1	Resultados	69
6.2	Avaliação	72
6.3	Discussão	74
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
7.1	Trabalhos futuros	78
7.1.1	Extração automática do esqueleto.....	78
7.1.2	Ajuste interativo das curvas de esboço.....	78
7.1.3	Aplicação de estilos.....	78
7.1.4	Composição de cenas complexas.....	79
7.1.5	Utilização da fonte de luz para a definição do <i>highlight</i>	79
	REFERÊNCIAS	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GPU	<i>Graphic Processing Unit</i>
IVIS	<i>Illustrative Visualization</i>
LIC	<i>Line Integral Convolution</i>
NPR	<i>Non-Photorealistic Rendering</i>
ROI	<i>Region Of Interest</i>

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1: Exemplos de ilustrações tradicionais médicas (http://www.atenmedicalart.com/) e técnicas (http://www.khulsey.com/). Caveira humana (a), implantação de dispositivo de assistência no ventrículo esquerdo (b), filtro de óleo (c) e caminhonete 4x4 Isuzu (d).....15
- Figura 1.2: Fotografia de procedimento cirúrgico (a), e ilustração do mesmo processo (b).....16
- Figura 1.3: Exemplos de ilustração com linhas de características, por John Blackman..17
- Figura 1.4: Exemplos de (a) linhas combinadas (*hatching*) e (b) linhas de contorno. Ilustrações de Bill Andrews e Gerald Hodge.....18
- Figura 2.1: Como orientação de linhas é uma característica de processamento pré-atentivo, a linha com orientação diferente é facilmente detectada (a). No entanto, paralelismo de linhas não é processado no estágio pré-atentivo, o que torna mais difícil localizar o par de linhas paralelas (b).....22
- Figura 2.2: O padrão em (a) é percebido como uma cruz na frente de um retângulo e não como as duas formas mostradas em (b). Isso ocorre, pois a cruz com o retângulo tem uma maior simetria (no eixo horizontal).....23
- Figura 2.3: O princípio do fechamento da forma de Gestalt diz que mecanismos neurais operam para encontrar soluções perceptuais envolvendo contornos fechados. Em (a), vemos um círculo atrás de um retângulo e não um anel aberto (b).....23
- Figura 2.4: As áreas pretas são menores, e portanto, são mais fáceis de serem percebidas como objetos. Também é mais fácil perceber padrões que são orientados horizontalmente e verticalmente como objetos.....23
- Figura 2.5: Simetria, espaço branco em volta, e um contorno fechado, todos contribuem para a percepção de que esta forma é figura e não plano de fundo.....24
- Figura 2.6: Dissonância visual em ilustração médica causada pela ambigüidade entre figura e plano de fundo.....25
- Figura 2.7: Exemplo do efeito Müller-Lyer. À esquerda, as duas linhas horizontais têm o mesmo comprimento e, à direita, as duas linhas verticais também.....26
- Figura 2.8: Exemplo do efeito de fechamento de forma. Pode-se reconhecer claramente a íris e pupila do olho sem que estejam desenhadas completamente.....27
- Figura 2.9: Exemplo do efeito de Poggendorf. O observador tem a percepção de que os vasos são contínuos quando ocultados por outros vasos.27

Figura 2.10: Efeito “ <i>Cookie Cutter</i> ” (a) na região apontada pela seta vermelha, e correção (b) através da quebra do contorno.....	28
Figura 2.11: Exemplo de efeito “alvo” criado pelos círculos concêntricos da pupila, íris e globo ocular.....	28
Figura 2.12: Ilusão de Jastrow. Temos a impressão de que a figura de baixo é maior; na verdade as duas figuras são iguais.....	29
Figura 2.13: Constância de objetos. Em (a) temos uma porta (retângulo) vista em perspectiva, representada por um trapézio. Informação de contexto ajuda na percepção do objeto (b).....	29
Figura 2.14: Ilusão dos triângulos de Kanizsa.....	30
Figura 2.15: Diferentes figuras obtidas apenas variando espessura de borda e usando sobreposição aparente com constância de forma/objeto.....	30
Figura 2.16: Tratamento de bordas. Bordas fortes e grossas avançam em direção ao observador, enquanto que bordas fracas e finas recuam.....	31
Figura 2.17: Exemplo do uso de linhas combinadas para representar sombreamento e textura. Ilustração de Bill Andrews.....	31
Figura 2.18: Exemplo do efeito de “listras de zebra”.....	32
Figura 2.19: Exemplo do reconhecimento de padrões. Em meio ao caos das manchas podemos ver claramente a imagem de um cachorro malhado.....	33
Figura 2.20: Exemplo do efeito de raios fantasmas.....	33
Figura 2.21: Exemplo da ilusão de Hermann.....	34
Figura 2.22: <i>Perspective contouring</i> : ilustração de Gerald Hodge demonstrando o uso da linha de horizonte interno.....	35
Figura 2.23: Ilustração médica por Gerald Hodge onde é usado o <i>perspective contouring</i>	35
Figura 2.24: Ilustrações por Gerald Hodge onde <i>perspective contouring</i> é usado.....	36
Figura 2.25: Imagem gerada por Girshick (2000) a partir de um conjunto de dados volumétricos extraído por tomografia de uma pélvis humana. Linhas seguem direção da curvatura principal.....	39
Figura 2.26: Imagem gerada com iluminação e sombreamento (a) e imagem LIC com linhas de silhueta (b).....	40
Figura 2.27: À esquerda, há problemas de discretização no campo direcional de curvatura máxima (em vermelho). À direita o usuário seleciona interativamente algumas linhas-chave (em vermelho) e as linhas restantes (em verde) são calculadas por interpolação.....	41
Figura 2.28: Resultado obtido com a técnica de Rössl (2000).....	41
Figura 2.29: Passos do algoritmo de Deussen (1999).....	42
Figura 2.30: Resultado obtido com a técnica de Deussen (1999).....	43

Figura 2.31: Codificação da distância de estruturas vasculares para o observador. Linhas mais grossas indicam uma distância menor para do observador.....	44
Figura 2.32: Linhas usadas para representar sombra entre dois segmentos vasculares que se sobrepõem. O tamanho da sombra indica a distância em profundidade entre os dois segmentos que se sobrepõem.....	45
Figura 3.1: Primeiro passo interativo da construção da ilustração. Usuário define curva de eixo através de esboço (em verde) sobre o modelo.....	48
Figura 3.2: Segundo passo interativo da criação da ilustração. Usuário define a ROI com uma curva de <i>highlight</i> (em azul) esboçada sobre o modelo.....	49
Figura 3.3: Terceiro passo interativo da criação da ilustração. Usuário ajusta propriedades das linhas de desenho fora da ROI através de curvas de função. As curvas usadas para ajustar a espessura das linhas de silhueta são exibidas em verde.....	50
Figura 3.4: Processo de criação de uma ilustração. As caixas em verde representam ações executadas no sistema que podem ter como entrada tanto resultados de outras ações (em elipses azuis) quanto interação direta do usuário (caixas amarelas).....	51
Figura 4.1: Exemplos de linhas de construção (tracejado) usadas na ilustração tradicional para indicar forma e volume de braços e pernas.....	53
Figura 4.2: Captura do esboço. À esquerda, esboço não filtrado; à direita, esboço final com pontos de controle após a subdivisão reversa de Chaikin ter sido aplicada três vezes.	55
Figura 4.3: Curvas de seção (em vermelho) extraídas de uma malha representando pulmões e traqueia. Curvas de eixo utilizadas são desenhadas em azul.....	57
Figura 4.4: Construção de uma linha de contorno. Faixa de triângulos (cinza) é criada com vértices (amarelo) deslocados de pontos (azul) da curva de seção (vermelho) na direção perpendicular (preto) ao plano da seção, mas em sentidos opostos. O deslocamento é definido principalmente pela espessura definida para a linha.....	58
Figura 4.5: Criação de uma aresta da malha de silhueta. Dada uma aresta da malha do objeto ($V_1 - V_2$), dois vértices são criados a partir de cada vértice da malha original (V_1' , V_1'' , V_2' e V_2''). Os novos vértices formam um par de triângulos que são desenhados representando um segmento da linha de silhueta.....	60
Figura 5.1: Definição de uma ROI. A curva de <i>highlight</i> esboçada pelo usuário sobre o modelo (amarelo) intersecta um conjunto de curvas de seção (roxo) da curva de eixo mais próxima (azul). A seção central (verde) é usada como linha de horizonte interno na técnica do <i>perspective contouring</i>	63
Figura 5.2: Processo de criação de linha de contorno (da direita para a esquerda).....	65
Figura 5.3: Interface de definição das curvas de função. Cada painel, em cinza claro, mapeia, na sua extensão horizontal, a curva de eixo desde a borda da ROI (ao centro) até as extremidades (laterais opostas dos painéis). Na extensão vertical, os painéis mapeiam os valores da função corrente.....	66
Figura 5.4: Desenho da linha de silhueta. Caso os vetores das faces que compartilham a aresta do vértice em consideração tiverem sentidos opostos com relação à direção de visão, o vértice é desenhado.....	67

Figura 6.1: Resultado obtido com o sistema desenvolvido (b) a partir do modelo de um estômago humano (a).....	70
Figura 6.2: Resultado obtido com o sistema (b) a partir do modelo de um par de pulmões humanos (a).....	70
Figura 6.3: Resultado obtido com o sistema (b) a partir do modelo de um fígado humano (a).....	71
Figura 6.4: Resultado obtido com as curvas de função apresentadas nos painéis à direita.	71
Figura 6.5: Resultado obtido com as curvas de função apresentadas nos painéis à direita.	72
Figura 6.6: (a) Ilustração feita à caneta em papel do modelo do estômago humano, e (b) ilustração digital feita com o sistema desenvolvido.....	73
Figura 6.7: (a) Ilustração feita com a ferramenta Photoshop® do modelo de um par de pulmões humanos, e (b) ilustração digital feita com o sistema desenvolvido.....	73

RESUMO

Para criar representações do mundo real, ilustradores utilizam técnicas baseadas em princípios perceptuais para criar efeitos e comunicar informação de maneira eficiente e elegante. Nos últimos anos, essas técnicas têm sido adotadas na computação gráfica para melhorar a visualização de dados científicos.

Os ilustradores tradicionais conseguem compor imagens utilizando apenas linhas, gerando representações limpas e simples e com grande poder de comunicar forma. Apesar de alguns trabalhos tentarem reproduzir os efeitos das ilustrações tradicionais com linhas, os princípios perceptuais utilizados pelos artistas ainda não foram bem explorados. Esses princípios são importantes para gerar uma imagem fácil de interpretar, sem ambigüidades e criar efeitos como focos de atenção, sombreamento, noção de profundidade, etc.

Este trabalho explora as técnicas utilizadas pelos ilustradores profissionais na criação de visualizações digitais, propondo a adaptação de um método chamado *perspective contouring*, utilizado para criar focos de atenção em ilustrações baseadas em linhas de contorno. O sistema de ilustração desenvolvido utiliza uma interface baseada em esboço para a definição das regiões de interesse, onde se quer dar ênfase, para determinação de curvas de eixo do modelo e para o desenho de curvas de controle dos atributos das linhas de desenho, como espessura e espaçamento. A título de resultado, são apresentadas comparações de imagens criadas por um ilustrador profissional e imagens criadas pelo sistema desenvolvido.

Palavras-Chave: visualização ilustrativa, *perspective contouring*, interface baseada em esboço, desenho com linhas.

Construction of Contour Illustrations

ABSTRACT

To create representations of the real world, illustrators use techniques based on perceptual principles to create effects and communicate information in an efficient and elegant manner. In the last years, these techniques have been adopted in computer graphics to improve the visualization of scientific data.

Traditional illustrators can compose images using only lines, creating representations that are clean, simple and are suitable to communicate form. Although some works try to reproduce the effects of traditional line illustration, the perceptual principles used by artists are not fully explored. These principles are important to create an image that is easy to interpret and has no ambiguity, and also to create effects like focus of attention, shading, depth perception, etc.

In this work, we aim at exploring the techniques used by professional illustrators in the creation of digital visualizations, by proposing the adaptation of a method called perspective contouring, used to create focus of attention in contour lines illustrations. We implemented an illustration system that uses a sketch-based interface to define the regions of interest, where the emphasis is desirable, to create axis curves for the model, and to draw curves that control line attributes like width and spacing. As results, we present a comparison of images by a professional illustrator and images created with the developed system.

Keywords: illustrative visualization, perspective contouring, sketch-based interface, line illustration.

1 INTRODUÇÃO

Ilustrações são abstrações criadas por artistas para representar o mundo de uma maneira simples, porém fácil de entender. Ilustrações podem facilitar bastante o entendimento de um conceito, estrutura ou processo pela sua representação clara e compacta, e são usadas amplamente em diversas áreas, desde a literatura científica (medicina, botânica, zoologia, etc.) passando pela arquitetura até manuais técnicos (Figura 1.1). Apesar do avanço tecnológico dos dias de hoje permitirem a reprodução de fotografias nos documentos das áreas citadas, nota-se que, na maioria dos casos, ilustrações são usadas no lugar de fotografias devido ao fato de que informações complexas são melhor transmitidas através de desenhos abstratos do que com imagens realísticas (DEUSSEN, 1999).

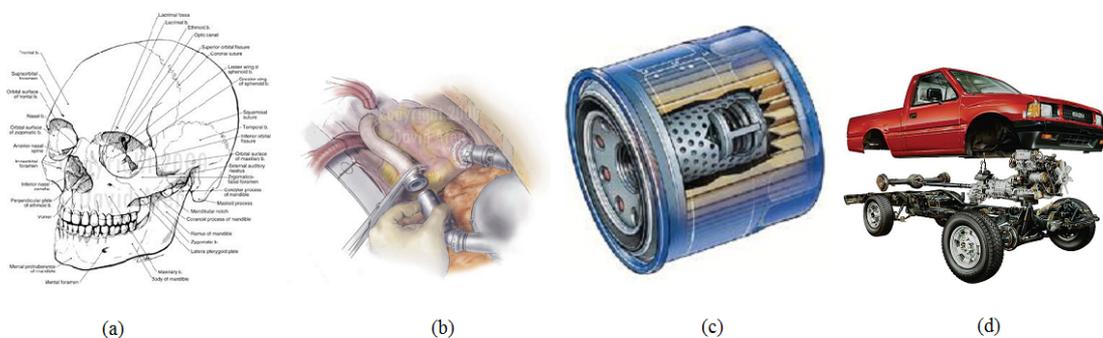
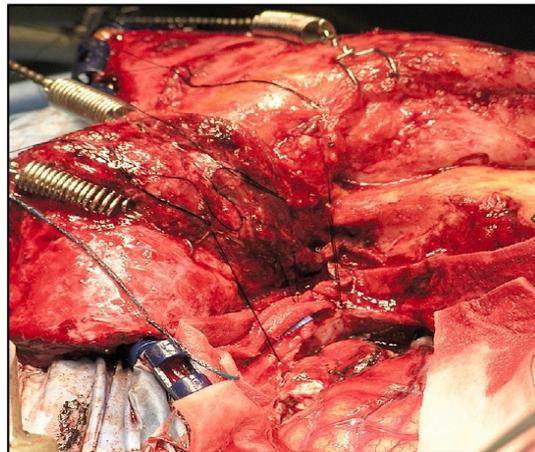


Figura 1.1: Exemplos de ilustrações tradicionais médicas (<http://www.atenmedicalart.com/>) e técnicas (<http://www.khulsey.com/>). Caveira humana (a), implantação de dispositivo de assistência no ventrículo esquerdo (b), filtro de óleo (c) e caminhonete 4x4 Isuzu (d).

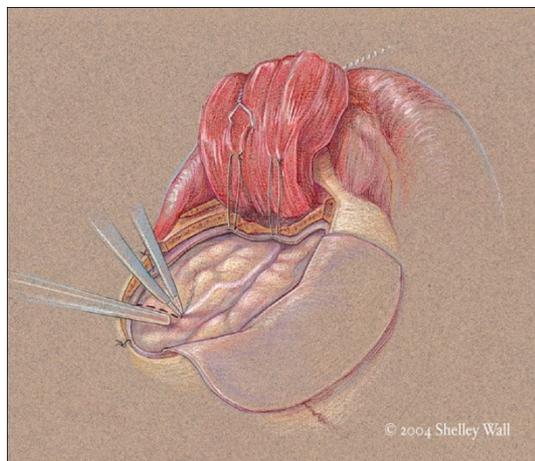
O poder das ilustrações reside em diversas técnicas usadas pelo artista para manipular os materiais e conseguir efeitos que comuniquem a idéia desejada. Essas técnicas são muito úteis para, entre outras coisas:

- Criar focos de atenção, que atraem os olhos do observador para as regiões do desenho que são mais importantes;
- Dar a noção de tridimensionalidade e volume ao desenho em um plano;
- Minimizar a sobrecarga visual, limitando o detalhamento da representação à informação que se deseja passar;
- Prover informação de contexto, que ajuda no entendimento da informação em foco sem interferir na atenção;
- Garantir a visibilidade de informações importantes, que na realidade estariam escondidas por informações menos importantes;

O uso dessas abstrações, apesar de poder criar representações não-realísticas, torna as visualizações muito mais eficientes na comunicação da informação. Um exemplo pode ser visto na Figura 1.2, onde a ilustração médica consegue transmitir a informação essencial de forma clara, simples e agradável.



(a)



(b)

Figura 1.2: Fotografia de procedimento cirúrgico (a), e ilustração do mesmo processo (b) (WOOLRIDGE, 2004).

De acordo com o ilustrador profissional Bill Andrews (VIOLA, 2006), na área médica há quatro casos em que ilustrações são as melhores mídias a serem usadas. Eles ocorrem quando:

- Áreas de referência existem fisiologicamente, mas não anatomicamente;
- Sobrepor uma estrutura a outra fornece informações relacionadas;
- Visões de seções mostram instrumentos em cavidades corporais, etc.;
- Eliminando lixo visual de uma foto pode produzir uma explicação mais simples.

O artista pode usar diferentes materiais e técnicas, dependendo do seu estilo e objetivo, para criar a representação pretendida. A técnica de desenho baseada em linhas (caneta nanquim) é uma das técnicas mais difíceis de serem dominadas devido ao seu alto grau de abstração das cores e tons contínuos do mundo real. A dificuldade não está apenas na tarefa de criar eficientemente a abstração, mas a audiência precisa ser capaz de decodificar a abstração como uma representação convincente da realidade. O uso das linhas, porém, é vantajoso para comunicar eficientemente a forma de um objeto de maneira simples e limpa.

As linhas podem ser usadas para identificar marcas características da forma do objeto, como, por exemplo, contornos, bordas, quinas, etc. Essas linhas definem a forma geral do objeto e não representam informação acerca de sua superfície (Figura 1.3).



Figura 1.3: Exemplos de ilustração com linhas de características, por John Blackman.

As linhas também podem ser combinadas para representar uma superfície e dar a impressão de sombreado. Essa técnica é chamada de *hatching*. Diferentes tons podem ser conseguidos alterando-se a espessura das linhas e o espaçamento entre elas, ou através do cruzamento de linhas, chamado de *cross-hatching*. Para acentuar a tridimensionalidade de um objeto, o artista utiliza linhas de contorno para representar a superfície (Figura 1.4).

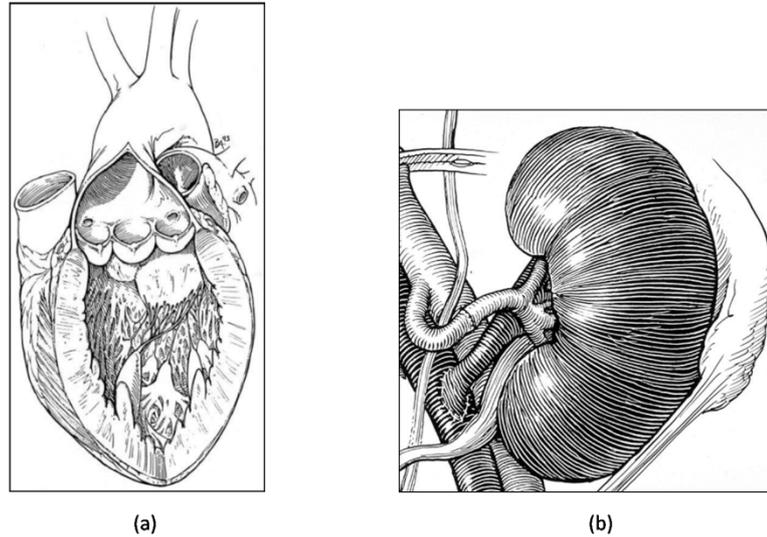


Figura 1.4: Exemplos de (a) linhas combinadas (*hatching*) e (b) linhas de contorno. Ilustrações de Bill Andrews e Gerald Hodge.

O processo de construção de uma ilustração é algo bastante custoso, que requer tempo e trabalho manual do artista. Logo, soluções computacionais que consigam reproduzir os efeitos e estilos artísticos podem facilitar o processo de construção das imagens. Vários trabalhos em computação gráfica atacaram essa linha de pesquisa que ficou conhecida como *rendering* não-fotorealístico (NPR, do inglês, *Non-Photorealistic Rendering*) (STROTHOTTE, 2002).

Os primeiros trabalhos em NPR voltados para ilustração seguiram diferentes correntes de pesquisa. Alguns trabalhos (HAEBERLI, 1990) (HAGGERTY, 1991) modificavam imagens fotorealísticas para lhes dar a aparência de uma pintura artística de forma quase automática. Por outro lado, Strassmann (1986), Cockshott (1991), Guo (1991) e Lee (1997) criaram modelos para simular fisicamente tinta e pincel e permitem que o usuário “pinte” interativamente sobre uma tela em branco. O efeito de pintura é também aplicado a animações por Meier (1996) com a utilização de partículas.

Para criar imagens convincentes do mundo real utilizando apenas linhas, os ilustradores fazem uso do conhecimento de como o sistema visual humano enxerga o mundo. O artista tira proveito de como percebemos formas, tons, contrastes, etc., para trabalhar as linhas de forma a trazer unidade e equilíbrio à ilustração, criando ênfase, texturas, superfícies e volumes, de maneira que passamos a não mais enxergar as linhas individualmente, mas sim o conjunto, a forma que elas representam. Esses princípios

perceptuais se não usados corretamente podem levar a artefatos visuais e quebra dessa visão de conjunto.

A estilização de linhas já está presente nos trabalhos de Appel (1979) e Kamada (1987) que procuravam maneiras de desenhar linhas ocultas em geometrias tridimensionais. Saito (1990) utiliza cenas tridimensionais e extrai informações de geometria como profundidade e vetores normais para encontrar linhas de características e realçar imagens realísticas ou criar desenhos com linhas. Salisbury (1994) e Winkenbach (1994) utilizam texturas com diferentes padrões de linhas para criar *hatching* interativo.

Os princípios perceptuais tanto usados na ilustração tradicional estão sendo, nos últimos anos, aplicados na visualização científica para aumentar a eficiência da comunicação e a expressividade das complexas imagens geradas. A recente área da visualização ilustrativa (IVIS, do inglês, *Illustrative Visualization* (SOUSA, 2005)) se compromete em desenvolver métodos para melhorar a visualização de dados científicos baseados nos fundamentos da ilustração tradicional. Informação de contexto (BRUCKNER, 2005), visibilidade de estruturas escondidas (BRUCKNER, 2006) e realce de características (RHEINGANS, 2001) são algumas das técnicas adotadas pela IVIS. Outro conceito interessante também adotado é o uso de marcações e manipulação por esboço. Uma interface baseada em esboço (do inglês, *sketch-based interface*) pode ser muito mais intuitiva em tarefas relacionadas à ilustração, principalmente para usuários ilustradores.

Apesar dos vários trabalhos em desenhos em linhas, algo importante que ainda não foi bem explorado é como direcionar a ênfase na ilustração. A ênfase, ou foco de atenção, é usada para realçar as regiões mais importantes da cena representada e direcionar a atenção do observador. Sem essa qualidade o desenho perde expressividade e se torna ineficiente, podendo até se tornar ambíguo com interpretações erradas.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método de construção de ilustrações com linhas simples e intuitivo de forma a permitir que o usuário defina regiões de foco de atenção onde uma ênfase maior será dada seguindo princípios perceptuais usados na ilustração tradicional. Para isso, é adaptada uma técnica usada por artistas profissionais chamada *Perspective Contouring*, onde linhas de contorno são manipuladas para gerar ênfase. Outra característica importante é o uso de marcações por esboço, para definir as regiões de interesse e controlar o comportamento das linhas de desenho.

1.1 Contribuições do trabalho

A principal contribuição deste trabalho é a adaptação da técnica *perspective contouring* para um sistema de ilustração com linhas de contorno que permite a

definição de focos de atenção através de marcação por esboço. Isso é uma contribuição importante para a área de NPR e IVIS, pois permite criar representações mais expressivas e de maneira intuitiva. Como contribuições menores, a dissertação apresenta:

- Uma interface baseada em esboço para manipulação interativa das propriedades das linhas de desenho e seleção das regiões de foco;
- A exploração do uso de seções da geometria como primitivas de desenho.

1.2 Organização do texto

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, são apresentados os princípios perceptuais envolvidos na criação de uma ilustração baseada em linhas, e são discutidos os trabalhos relacionados nos campos NPR e IVIS. No terceiro capítulo, o sistema de ilustração é apresentado. As estruturas geométricas utilizadas na implementação do sistema são detalhadas no capítulo 4, e o capítulo 5 descreve o método de composição do *hatching*. Resultados são apresentados no capítulo 6, e o capítulo 7 encerra com conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Percepção visual

Para criar imagens que consigam passar informações ao observador de maneira eficiente é preciso entender como o sistema visual humano funciona e explorar suas características. Ware (2000) apresenta um modelo simplificado do processamento de informação do sistema visual humano para a percepção de um objeto, que será descrita a seguir.

No primeiro estágio, a informação visual é processada por um grande conjunto de neurônios localizados nos olhos e no córtex visual primário na parte de trás do cérebro. Cada neurônio é especializado em reconhecer certos tipos básicos de características, como forma, movimento, cor e profundidade. Para cada tipo de informação, uma grande malha de neurônios trabalha em paralelo extraindo características do ambiente de maneira muito rápida.

No próximo estágio, acontece a percepção de padrões 2D, os contornos que formam as bordas dos objetos são detectados e o mundo visual é segmentado em regiões baseado nessas primitivas. Em seguida, as estruturas dos objetos e cenas são descobertas usando-se informações sobre as conexões entre partes dos componentes, informação de forma pelo sombreado, etc. Finalmente, os objetos são identificados através da comparação com representações armazenadas na memória.

No primeiro estágio acontece o chamado processamento pré-atentivo, que torna possível detectar rapidamente objetos que tenham certas características diferentes de objetos próximos. Algumas das características que são detectadas nesse processamento são (Figura 2.1): orientação, comprimento e espessura de linhas; tamanho; curvatura e posicionamento 2D.

Para que o observador possa entender rapidamente uma informação, em uma rápida olhada, ela precisa ser apresentada de uma maneira que possa ser facilmente detectada nesse primeiro estágio de processamento.

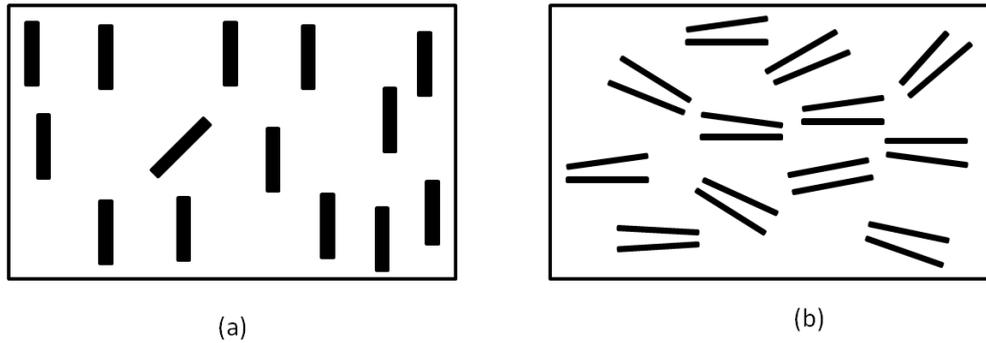


Figura 2.5: Como orientação de linhas é uma característica de processamento pré-atentivo, a linha com orientação diferente é facilmente detectada (a). No entanto, paralelismo de linhas não é processado no estágio pré-atentivo, o que torna mais difícil localizar o par de linhas paralelas (b).

A percepção de padrões é um conjunto de processos 2D intermediários que ocorrem entre a análise de características e a percepção do objeto completo, e logo, provê um nível de abstração que pode dizer bastante a respeito de como organizar a informação para que estruturas importantes sejam percebidas. As leis de Gestalt (KOFFKA, 1935), produzidas por um grupo de psicólogos alemães que fundaram a Escola Gestalt, descrevem a maneira como percebemos padrões em duas dimensões. Algumas dessas leis são apresentadas abaixo.

- Proximidade: proximidade espacial é um dos mais poderosos princípios de organização perceptual. Coisas que estão próximas umas das outras são percebidas como um grupo.
- Similaridade: as formas de elementos individuais de um padrão também podem determinar como eles são agrupados. Elementos similares tendem a ser agrupados juntos.
- Continuidade: é mais fácil construir entidades visuais a partir de elementos visuais que são suaves e contínuos, do que de elementos que contém mudanças abruptas de direção.
- Simetria: simetria pode prover um poderoso princípio de organização. Figuras simétricas são percebidas mais facilmente (Figura 2.2).
- Fechamento de formas: um contorno fechado tende a ser visto como um objeto. Segundo os psicólogos de Gestalt, há uma tendência perceptual para fechar contornos que têm pequenas aberturas neles (Figura 2.3).
- Tamanho relativo: em geral, componentes menores de um padrão tendem a serem percebidos como objetos (Figura 2.4).
- Figura e plano de fundo: uma figura é algo que é percebido como objeto, e plano de fundo é o que está atrás da figura. A percepção de figura ao invés de plano de fundo pode ser pensada como o ato perceptual fundamental na identificação de objetos. Todas as leis de Gestalt contribuem para o resultado da identificação da figura e plano de fundo (Figura 2.5).

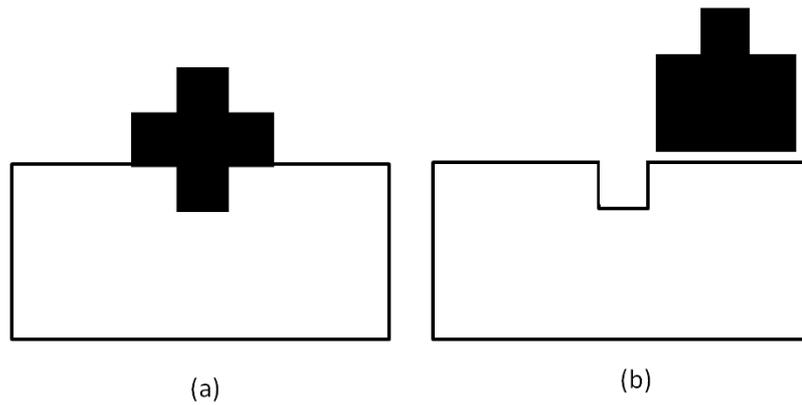


Figura 2.6: O padrão em (a) é percebido como uma cruz na frente de um retângulo e não como as duas formas mostradas em (b). Isso ocorre, pois a cruz com o retângulo tem uma maior simetria (no eixo horizontal).

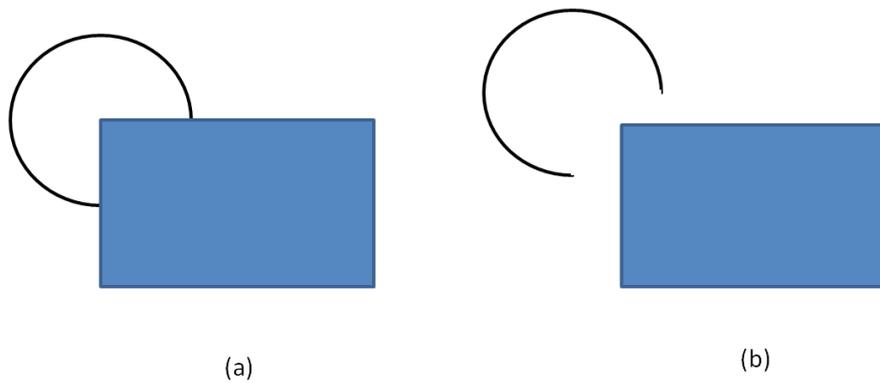


Figura 2.7: O princípio do fechamento da forma de Gestalt diz que mecanismos neurais operam para encontrar soluções perceptuais envolvendo contornos fechados. Em (a), vemos um círculo atrás de um retângulo e não um anel aberto (b).

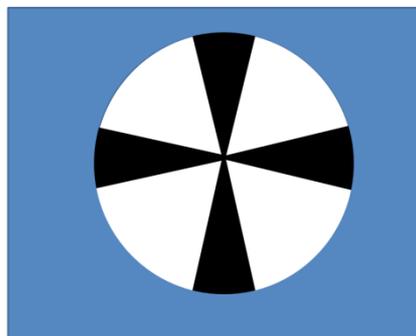


Figura 2.8: As áreas pretas são menores, e portanto, são mais fáceis de serem percebidas como objetos. Também é mais fácil perceber padrões que são orientados horizontalmente e verticalmente como objetos.

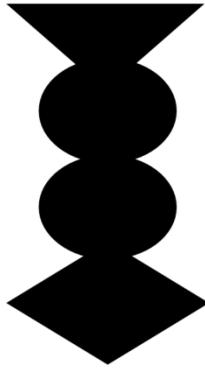


Figura 2.9: Simetria, espaço branco em volta, e um contorno fechado, todos contribuem para a percepção de que esta forma é figura e não plano de fundo.

Na próxima seção apresentamos alguns princípios perceptuais aplicados no desenvolvimento de ilustrações com linhas.

2.2 Princípios perceptuais em ilustração com linhas

Sendo uma técnica bastante difícil de ser dominada, o desenho com linhas exige o conhecimento de como a percepção visual humana funciona para criar efeitos e ilusões que permitem o entendimento de ilustrações bastante abstratas. Aqui, apresentamos alguns dos princípios perceptuais usados pelos ilustradores de acordo com o ilustrador profissional Bill Andrews (VIOLA, 2006).

Ilustração com linhas envolve qualquer técnica de ilustração que possa ser reproduzida exclusivamente em preto e branco, sem tons de cinza. Tons de cinza podem ser conseguidos através de ilusões óticas para dar a impressão de cinza usando-se apenas preto e branco.

Para conseguir “decodificar” uma ilustração com linhas, o cérebro humano utiliza “pistas” perceptuais que envolvem elementos como contrastes, formas, direção das linhas, etc. Caso essas “pistas” sejam contraditórias, elas causam dissonância visual, que dificulta a interpretação da ilustração. A dissonância pode ser usada com apelo artístico para intrigar o espectador, mas geralmente em ilustrações científicas e médicas comprometem a eficiência.

Parte da dificuldade de se fazer ilustrações utilizando técnicas de linhas se deve à natureza dual da linha. Uma linha é o segmento mais curto entre dois pontos, é unidimensional e não tem espessura, apenas comprimento, e assim não pode existir na

natureza. Podemos, então, chamar de linha uma forma que tenha o comprimento maior do que sua espessura. Logo, as linhas usadas nas ilustrações são, na verdade, formas. Linhas também podem ser descritas como planos vistos de arestas, e planos são comumente vistos como formas. A dualidade da linha está em poder representar tanto planos ou formas como arestas ou linhas, e isso contribui para a natureza abstrata da ilustração com linhas.

As “pistas” perceptuais envolvidas na construção e leitura de uma ilustração com linhas incluem:

- O relacionamento entre claro e escuro;
- Reconhecimento de arestas, padrões e formas;
- Direção de linha e a interação de linhas seguindo diferentes direções;
- Foco e relacionamento entre arestas fortes e fracas;
- Níveis de detalhe e textura.

Esses elementos estão envolvidos nos fenômenos perceptuais que analisamos a seguir.

2.2.1 Contraste entre preto e branco

Começamos pelas propriedades básicas do preto e branco. Se o balanço entre claro e escuro é aproximadamente igual, pode haver ambigüidade entre a figura e o plano de fundo. Em geral a forma mais familiar ou reconhecível se torna a figura.

Um exemplo de dissonância em ilustração médica causada pelo efeito de ambigüidade entre figura e plano de fundo é mostrado na Figura 2.6, onde a região interna do cérebro pode ser confundida com o plano de fundo, causando confusão.

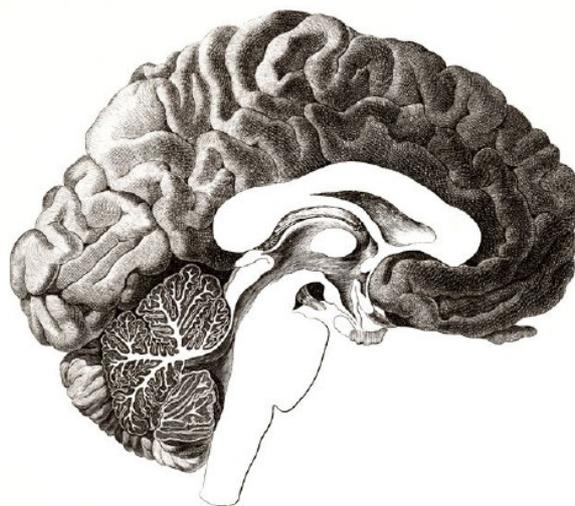


Figura 2.10: Dissonância visual em ilustração médica causada pela ambigüidade entre figura e plano de fundo. (VIOLA, 2006)

2.2.2 Orientação

Além de problemas com preto e branco, temos dificuldades na percepção do tamanho relativo entre linhas horizontais e verticais. Um exemplo, chamado de Müller-Lyer, cai na mesma situação de problemas de percepção dos tamanhos relativos das linhas, mas com a adição de raios nas extremidades das linhas para reforçar ou subjugar o comprimento das linhas (Figura 2.7).

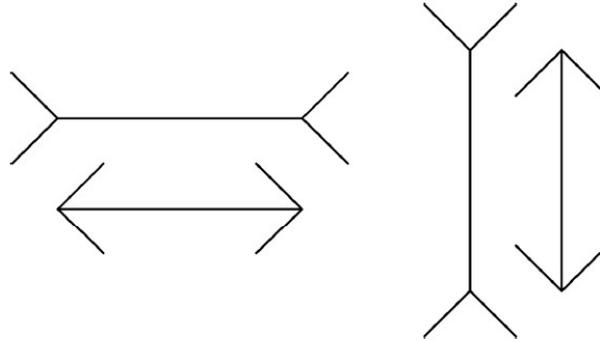


Figura 2.11: Exemplo do efeito Müller-Lyer. À esquerda, as duas linhas horizontais têm o mesmo comprimento e, à direita, as duas linhas verticais também. (VIOLA, 2006)

2.2.3 Linhas como formas

Há propriedades interessantes quando temos linhas representando formas. A percepção humana tem uma afinidade por formas geométricas simples, chegando ao ponto de enxergar formas onde elas não existem. A maneira como o sistema perceptual funciona torna a preferência de formas uma propriedade perceptual muito potente. A percepção humana prefere simplicidade à complexidade, ordem ao caos. Além do mais, humanos são muito bons em organizar pedaços em algo completo e fazer associações por proximidade.

A preferência de formas é algo tão poderoso, que não precisamos sequer mostrar uma forma completa para que o observador a veja (Figura 2.8). Essa propriedade é chamada de fechamento de forma e pode ser algo bom, pois o ilustrador não precisa desenhar tudo, mas algumas vezes pode ser ruim, quando formas não intencionais podem chamar a atenção do observador, causando dissonância.

A manipulação de preferência de formas e a ilusão de Poggendorf são duas poderosas ferramentas no arsenal do ilustrador. A ilusão de Poggendorf, descoberta por J. C. Poggendorf, físico, na década de 60 do século 19, permite-nos perceber a idéia de que objetos são contínuos atrás de objetos opacos ou semitransparentes (Figura 2.9).

Se unirmos preferência de forma com ambigüidade de figura e plano de fundo, o resultado é o efeito conhecido como “*Cookie Cutter*”, onde a dissonância visual aparece quando nossa percepção de uma forma simples prevalece sobre a percepção da forma

tridimensional de um objeto. Para remediar a situação, quebra-se a forma simples que chama a atenção do observador (Figura 2.10).

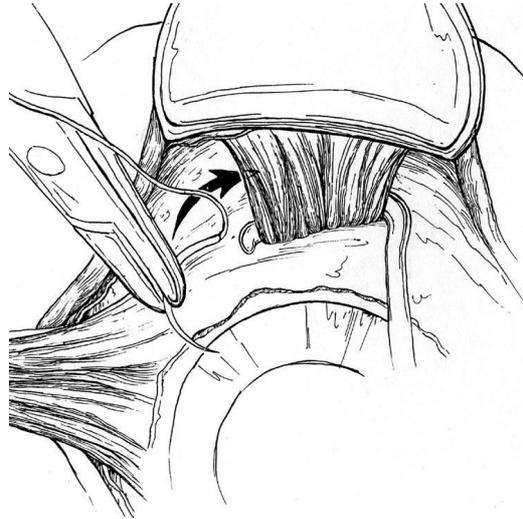


Figura 2.12: Exemplo do efeito de fechamento de forma. Pode-se reconhecer claramente a íris e pupila do olho sem que estejam desenhadas completamente. (VIOLA, 2006)



Figura 2.13: Exemplo do efeito de Poggendorf. O observador tem a percepção de que os vasos são contínuos quando ocultos por outros vasos. (VIOLA, 2006)

Um caso especial de preferência de forma é conhecido como efeito “alvo”, onde círculos concêntricos aninhados funcionam como ondas circulares que atraem a atenção do observador para dentro e fora dos círculos (Figura 2.11). Esse efeito pode causar

muitos problemas à intenção de foco do ilustrador (assumindo que o “alvo” não seja o centro de atenção do observador). Para consertar esse tipo de problema, geralmente usa-se o fechamento de forma para que os círculos sejam vistos sem que sejam totalmente desenhados.

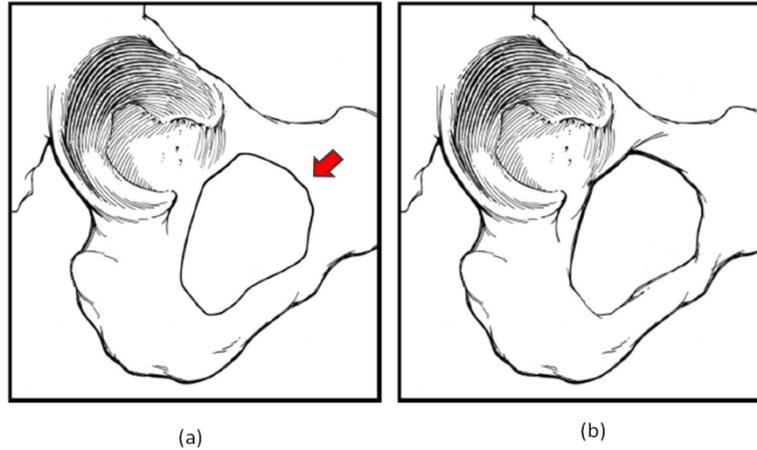


Figura 2.14: Efeito “*Cookie Cutter*” (a) na região apontada pela seta vermelha, e correção (b) através da quebra do contorno. (VIOLA, 2006)

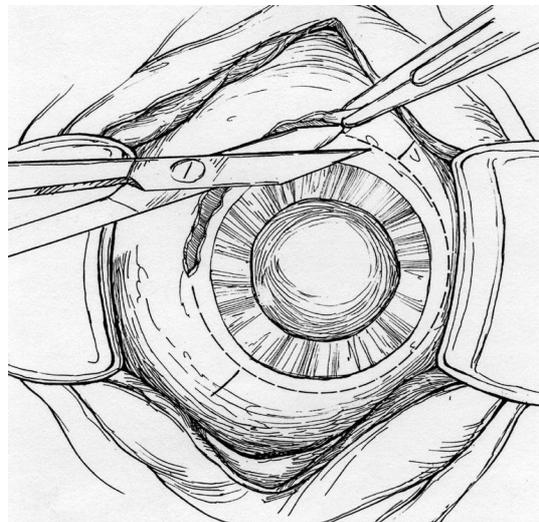


Figura 2.15: Exemplo de efeito “alvo” criado pelos círculos concêntricos da pupila, íris e globo ocular. (VIOLA, 2006)

Após preferência de formas, temos constância de formas. O princípio é que se itens têm a mesma forma, eles devem ser a mesma coisa, e logo, o maior deve estar mais próximo. Contudo, a ilusão de Jastrow (Figura 2.12) demonstra uma fraqueza em nossa habilidade de contar com constância de forma como uma “pista” de distância e profundidade.

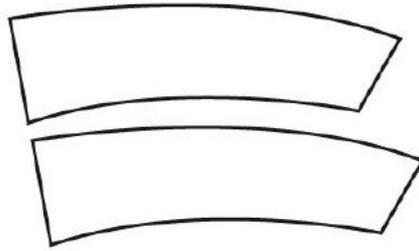


Figura 2.16: Ilusão de Jastrow. Temos a impressão de que a figura de baixo é maior; na verdade as duas figuras são iguais. (VIOLA, 2006)

Se adicionarmos uma terceira dimensão à constância de forma, temos constância de objetos. Como exemplo, considere uma porta. A porta é retangular, a não ser quando vista em perspectiva, quando se torna um trapézio. Temos uma forma diferente que representa o mesmo objeto. Assim como a familiaridade usada na ambigüidade de figura e plano de fundo, aqui o contexto é essencial para o uso e visualização correta de imagens com constância de objetos (Figura 2.13).

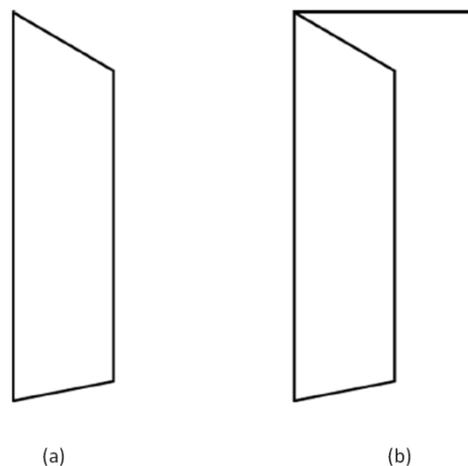


Figura 2.17: Constância de objetos. Em (a) temos uma porta (retângulo) vista em perspectiva, representada por um trapézio. Informação de contexto ajuda na percepção do objeto (b). (VIOLA, 2006)

Sobreposição aparente é uma poderosa técnica para desenvolver representações convincentes de objetos tridimensionais. Ela permite, através de constância de forma/objeto, desenhar o que parece formas completas usando apenas formas parciais. Um bom exemplo dessa técnica é a ilusão dos triângulos de Kazisa (Figura 2.14). Usando apenas fechamento e constância de forma junto com sobreposição e a ilusão de Poggendorf, Kazisa criou uma convincente cadeia de objetos e senso de profundidade.

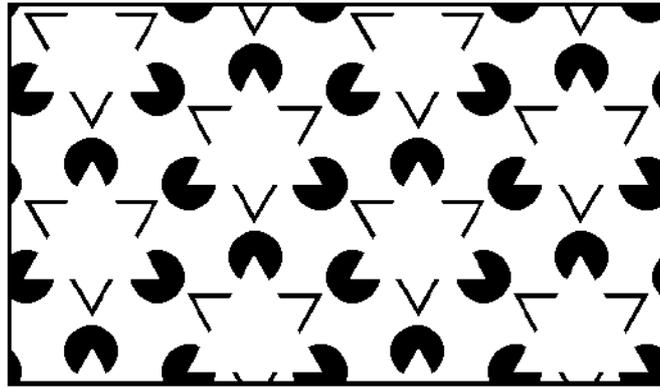


Figura 2.18: Ilusão dos triângulos de Kanzisa. (VIOLA, 2006)

2.2.4 Linhas como bordas

A borda de uma forma, mesmo de uma forma incompleta (aberta), não precisa ser uniforme. Podemos aumentar nossa capacidade de criar imagens representativas convincentes usando variações de espessura de linha em conjunto com sobreposição aparente e constância de forma/objeto (Figura 2.15).

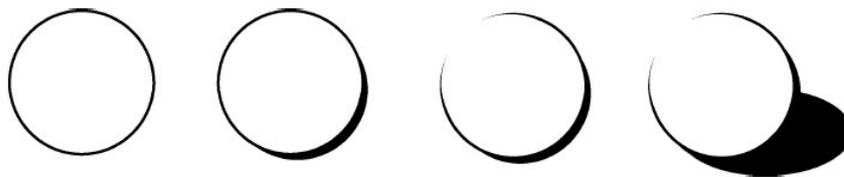


Figura 2.19: Diferentes figuras obtidas apenas variando espessura de borda e usando sobreposição aparente com constância de forma/objeto. (VIOLA, 2006)

No tratamento de bordas há duas propriedades primárias envolvidas: espessura e força. Linhas fortes e grossas avançam em direção ao observador, e linhas fracas e finas recuam (Figura 2.16).

2.2.5 Linhas como tons

Uma técnica bastante poderosa em ilustração de linhas é o uso de grupos de marcações (linhas, pontilhado, *hatching*) como formas. Esse agrupamento de marcações é chamado de “linhas combinadas” (do inglês, *compounded lines*). Um grupo de marcações está combinado se o observador percebe o grupo como um todo ao invés de linhas individuais. Linhas combinadas são ideais para adicionar sombreamento e textura (Figura 2.17).

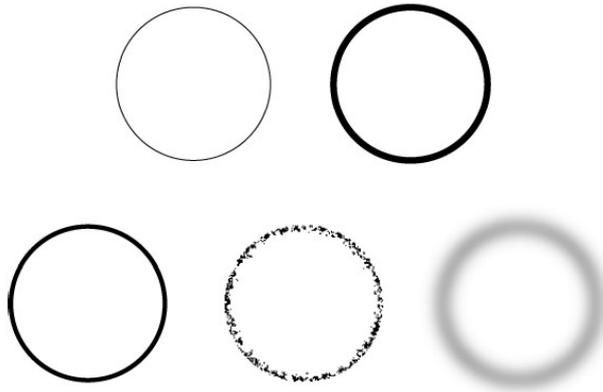


Figura 2.20: Tratamento de bordas. Bordas fortes e grossas avançam em direção ao observador, enquanto que bordas fracas e finas recuam. (VIOLA, 2006)

Dois conceitos são importantes ao fazer linhas combinadas: a espessura das linhas e a distância entre linhas sucessivas (periodicidade). Alterando apenas esses dois elementos, podemos criar uma gama de efeitos.

Linhas combinadas funcionam melhor quando reforçam a forma geral da estrutura em que são usadas. Elas podem ser usadas para descrever variações locais da geometria da superfície, textura e variações locais de tom. Quando o relacionamento entre a espessura das linhas e o espaçamento entre elas está desbalanceado, a percepção das linhas individuais anula a percepção de grupo. Isso é chamado de “listras de zebra” (Figura 2.18).



Figura 2.21: Exemplo do uso de linhas combinadas para representar sombreamento e textura. Ilustração de Bill Andrews. (VIOLA, 2006)

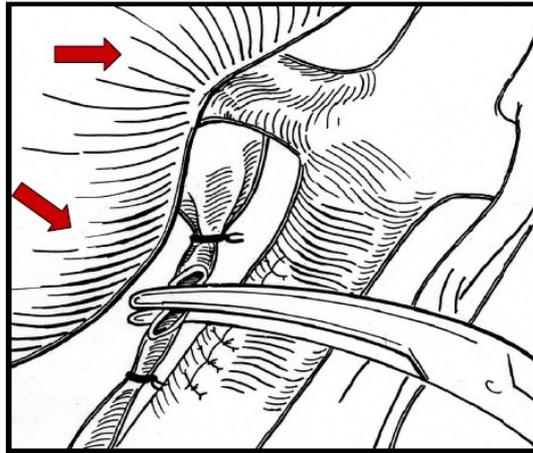


Figura 2.22: Exemplo do efeito de “listras de zebra”. (VIOLA, 2006)

2.2.6 Linhas e padrões

Assim como com constância de forma e objeto, o cérebro humano parece preferir e preservar padrões. Padrões são grupos de marcações aparentemente organizados e podem ativar a percepção de:

- Geometrias fantasmas que se repetem;
- Objetos familiares;
- Sinal não intencional no ruído.

Junto com preferência de forma, reconhecimento de padrões é uma das mais poderosas “pistas” visuais. A ilusão do cachorro malhado (Figura 2.19) é um dos melhores exemplos disso. Ao ver as manchas pretas distribuídas aparentemente aleatoriamente pela página, podemos, com uma rápida olhada, encontrar ordem no caos. Em grande parte, tanto familiaridade e contexto irão determinar que padrões se vê no ruído.

Alguns problemas podem surgir quando esses princípios não são levados em consideração. Por exemplo, em *crosshatching*, geralmente usado para construir áreas tonais, se dois ou mais conjuntos de linhas combinadas são sobrepostos um padrão de interferência é criado. Os conjuntos de linhas precisam ser relativamente longos para que isso ocorra. Essa interferência é a base de vários problemas em ilustração de linha. O primeiro são raios fantasmas (Figura 2.20). Esse padrão de interferência é devido a dois ou mais conjuntos de linhas paralelas que se cruzam. Um problema semelhante, a ilusão de Hermann (Figura 2.21), envolve a visão de pontos que não existem nas interseções entre dois conjuntos de linhas que se cruzam. Ambas as ilusões funcionam em preto sobre branco e vice-versa.



Figura 2.23: Exemplo do reconhecimento de padrões. Em meio ao caos das manchas podemos ver claramente a imagem de um cachorro malhado. (VIOLA, 2006)

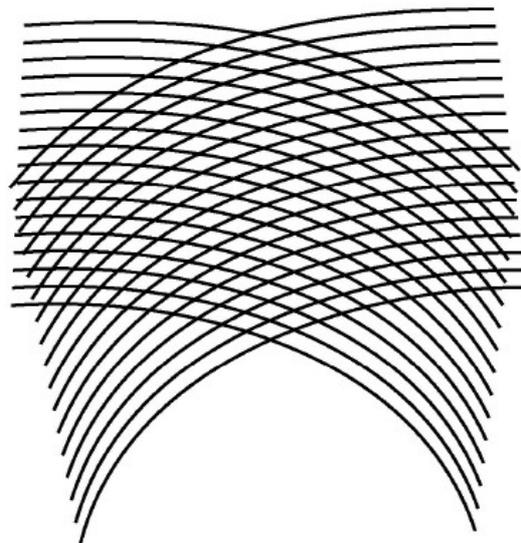


Figura 2.24: Exemplo do efeito de raios fantasmas. (VIOLA, 2006)

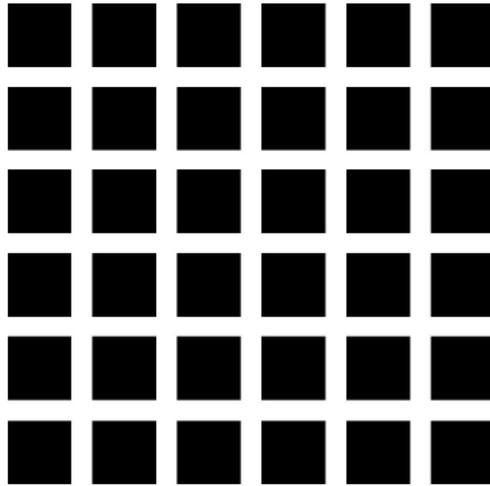


Figura 2.25: Exemplo da ilusão de Hermann. (VIOLA, 2006)

Algumas técnicas existem para resolver esses problemas de padrões de interferência. Os melhores métodos envolvem usar linhas mais curtas que impedem que qualquer padrão se forme. Pontilhado é um método que utiliza linhas muito curtas ou pontos e possibilita a representação fina de tons de cinza sutis, apesar de ser tedioso de se produzir à mão e difícil de ser dominado por novatos.

2.2.7 Linha de horizonte interno

A técnica focada neste trabalho é um caso especial de perspectiva, muito usada em estruturas tubulares em ilustrações médicas. O método pode ser usado para criar focos de atenção, ao produzir áreas que parecem avançar em direção ao observador.

Ao usar essa técnica, o ilustrador, ao invés de usar uma linha de horizonte universal para a cena, utiliza uma linha de horizonte interno, geralmente perpendicular ao eixo longo do objeto sendo desenhado. A partir dessa linha de horizonte interno, linhas que contornam a forma do objeto são traçadas (Figura 2.22). Para dar o efeito de perspectiva, o ilustrador precisa seguir as seguintes regras de construção:

- Linhas próximas da linha de horizonte interno são:
 - Mais grossas
 - Mais espaçadas (menor densidade)
 - Mais curtas (gerando um *highlight*)
- Linhas distantes da linha de horizonte interno são:
 - Mais finas
 - Mais próximas umas das outras (maior densidade)
 - Mais compridas
- A silhueta é mais fina próximo da linha de horizonte interno e mais grossa à medida que se afasta.

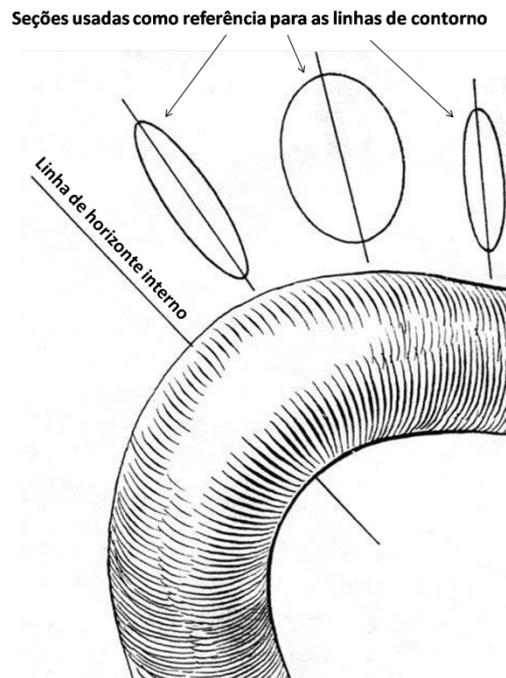


Figura 2.26: *Perspective contouring*: ilustração de Gerald Hodge demonstrando o uso da linha de horizonte interno. (VIOLA, 2006)

Alguns exemplos adicionais podem ser vistos nas Figuras 2.23 e 2.24.

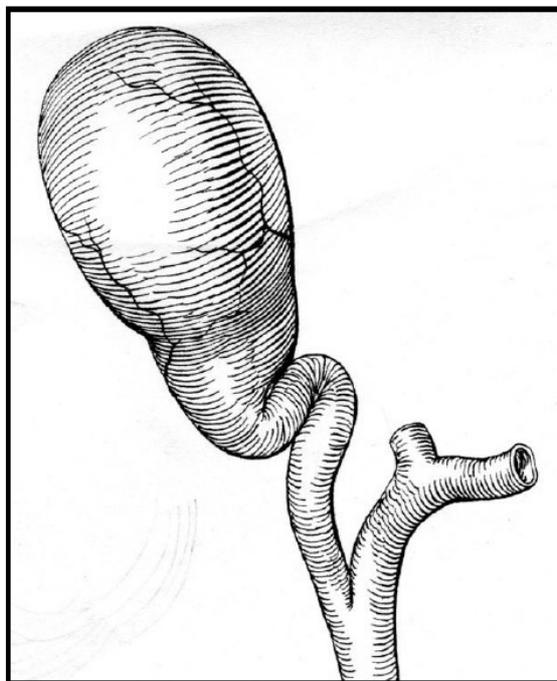


Figura 2.27: Ilustração médica por Gerald Hodge onde é usado o *perspective contouring*. (VIOLA, 2006)

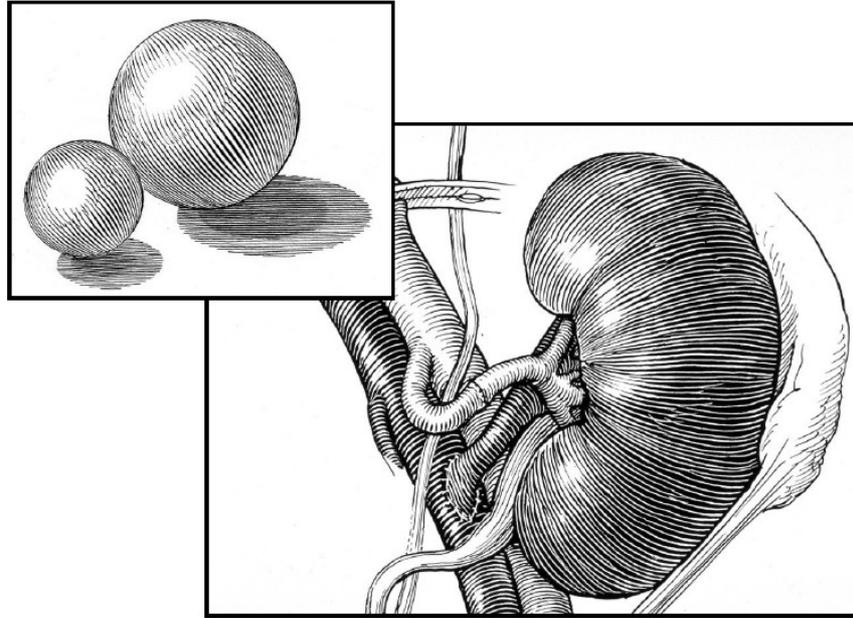


Figura 2.28: Ilustrações por Gerald Hodge onde *perspective contouring* é usado. (VIOLA, 2006)

2.3 Visualização Ilustrativa

A área da Visualização Ilustrativa visa desenvolver métodos para melhorar a visualização de um conjunto de dados com inspiração em fundamentos e técnicas da ilustração tradicional.

Vários trabalhos (VIOLA, 2005) (VIOLA, 2006) exploram técnicas ilustrativas na visualização de dados médicos e científicos. Foco de atenção é um aspecto importante para direcionar os olhos do observador às regiões mais importantes da estrutura em estudo e podem envolver tanto o realce das regiões de interesse quanto a diminuição da ênfase nas regiões de contexto. Viola (2005) propõe um modelo de visualização de dados volumétricos dependente do ponto de vista que remove obstruções às regiões de interesse automaticamente. Isso é obtido com a incorporação de mais uma dimensão na classificação dos elementos do volume. Além de determinar uma cor e uma opacidade para cada *voxel*, como na visualização tradicional, ele define um fator que indica a importância de cada elemento. Essa importância é usada para definir quais elementos são mais interessantes e têm maior prioridade de serem claramente visíveis.

Já outros trabalhos, ao invés de usarem transparência para permitir a visibilidade de regiões de interesse, utilizam deslocamento espacial das estruturas obstrutoras. Correa (2006) utiliza deformações em volumes baseadas em ilustrações médicas, onde as operações de deformação tentam criar efeitos semelhantes às ferramentas usadas em procedimentos cirúrgicos. Bruckner (2006) se inspira em ilustrações técnicas para criar

visualizações explodidas de dados volumétricos. Nessa técnica o foco de atenção permanece centralizado e as regiões de contexto em volta são divididas em pedaços e deslocadas para longe da região de interesse.

A informação de contexto também é importante, pois permite a localização da estrutura em foco e o entendimento do seu relacionamento com estruturas vizinhas. Com isso em mente, Bruckner (2005) utiliza informações de iluminação para calcular a transparência da região de contexto. Grandes regiões muito iluminadas geralmente correspondem a superfícies planas voltadas para a fonte de luz. A idéia é diminuir a opacidade nessas regiões, enquanto que regiões que recebem pouca iluminação, como contornos, permanecem visíveis.

Técnicas de desenho com linhas também apresentam grandes vantagens para a área de visualização. Ilustrações com linhas são claras, econômicas, e conseguem eficientemente comunicar a forma de estruturas complexas. A seguir, apresentamos os principais trabalhos nessa área.

2.3.1 Linhas de características

Trabalhos antigos como o de Appel (1979) já utilizavam linhas com *halos* para criar efeitos de profundidade, utilizando o princípio perceptual de sobreposição para melhorar a visualização de estruturas matemáticas. Kamada (1987) aplica estilização em linhas ocultas, permitindo uma melhor visualização da estrutura de objetos geométricos de um único ponto de vista. Essa área é novamente explorada por Dooley (1990) adotando regras de ilustração para o desenho de linhas de silhueta e linhas ocultas.

Strasmann (1986) estiliza linhas de *wireframe* de cenas arquitetônicas para dar uma impressão de esboço às imagens. Em seu trabalho, ele discute como as pessoas reagem diferentemente quando lhe são apresentadas imagens que parecem ter sido esboçadas à mão. Esse estilo dá um ar de algo inacabado, aberto à exploração, que não é conseguido com as imagens realísticas.

Em seu trabalho, Saito (1990) utiliza operações no espaço da imagem para obter linhas de arestas e silhuetas para realçar essas características em imagens realísticas. As linhas eram obtidas a partir de informações extraídas da geometria da cena, como profundidade, curvatura, normais, etc. Essas informações eram armazenadas, para um determinado ponto de vista da cena, em *framebuffers* especiais chamados de *G-buffers*. Assim, era possível saber informações sobre a geometria em cada pixel da imagem.

Em um trabalho mais recente, McGuire (2004) apresenta um método para desenho de silhuetas rápido utilizando o processador gráfico (GPU, do inglês, *Graphic Processing Unit*). Em um passo de pré-processamento, é criada uma malha de arestas, onde, para cada aresta da malha original, são criados quatro vértices formando uma face composta por dois triângulos. Em tempo de execução, os vértices são testados na GPU com relação ao vetor da câmera para determinar se fazem parte da silhueta ou não. Para

determinar isso, cada vértice é munido de dois vetores, a normal da face em que se encontra, e a normal da face vizinha (com relação à aresta em que o vértice se encontra).

Caso façam parte da silhueta, os vértices são movidos na direção da normal, criando a silhueta. Caso não façam parte da silhueta, os vértices não são desenhados na imagem final. Com isso consegue-se uma silhueta rápida e simples de se implementar. Uma versão modificada desse algoritmo foi usada neste trabalho para a criação da silhueta.

2.3.2 Linhas combinadas

Dentre os trabalhos que fazem aplicação de linhas combinadas, ou sombreamento usando linhas (*hatching*), a maioria consiste em aplicações automáticas das linhas sobre o modelo utilizando medições feitas em sua superfície, como direção de curvatura principal, para direcionar as linhas de desenho. Alguns desses trabalhos são destacados abaixo.

Winkenbach (1994) utiliza texturas com estilos e tons diferentes de *hatching* para gerar ilustrações de modelos tridimensionais. As ilustrações são geradas automaticamente indicando-se que tipo de textura aplicar a cada superfície e não há controle direto sobre as linhas desenhadas, já que as texturas são criadas previamente representando diferentes tons. Um trabalho semelhante é feito por Salisbury (1994) que também utiliza três tipos de informações fornecidas pelo usuário: uma imagem em escala de cinza que serve de referência para definir os tons da imagem final, um campo direcional que define a orientação das linhas, e texturas com as estilizações das linhas a serem usadas para preencher o desenho.

Dois anos mais tarde, Winkenbach (1996) descreve um método para a produção de ilustrações com linhas de superfícies suaves. Linhas paramétricas em *patches* de NURBS são usadas para determinar a direção do *hatching* e linhas de silhueta são calculadas usando aproximação poliedral à superfície. O principal foco é o uso da densidade do *hatching* para criar texturas complexas e efeitos de iluminação. Seu sistema conta com uma parametrização da superfície para produzir as direções de *hatching*, contudo, essa parametrização pode não existir para alguns tipos de superfície e quando existe pode não ser um bom indicativo de forma.

Girshick (2000) define um campo potencial sobre uma imagem utilizando as curvaturas principais do modelo e desenha linhas seguindo esse campo. As linhas são criadas distribuindo pontos esparsos sobre o modelo e os integrando na direção do campo direcional. O algoritmo pode ser usado tanto em uma malha geométrica como em um volume. A Figura 2.25 mostra um resultado obtido com esta técnica.

Ainda, seguindo a linha de usar campos vetoriais para direcionar o *hatching*, trabalhos como os de Interante (1997), Elber (1998, 1999) e Hertzmann (2000) utilizam

direções das curvaturas principais para orientar as linhas distribuídas sobre a superfície do modelo.

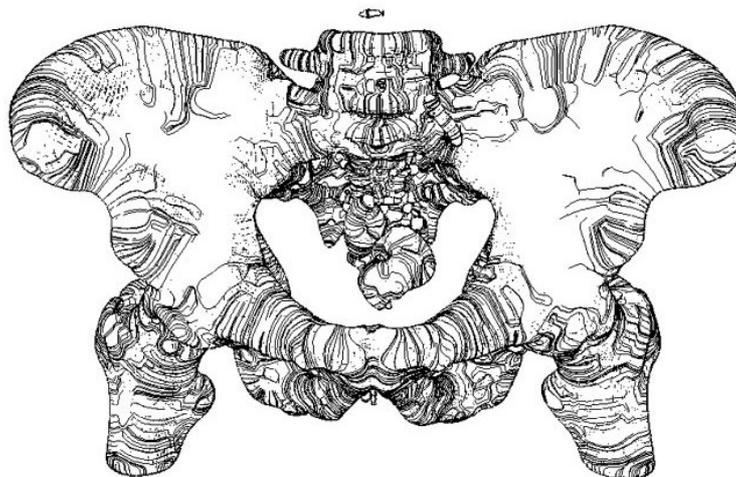


Figura 2.29: Imagem gerada por Girshick (2000) a partir de um conjunto de dados volumétricos extraído por tomografia de uma pélvis humana. Linhas seguem direção da curvatura principal. (GIRSHICK, 2000)

2.3.3 Linhas de contorno

Ao contrário dos trabalhos apresentados nas seções anteriores, a técnica descrita neste trabalho utiliza linhas longas que percorrem o contorno do modelo e são úteis para informar a estrutura tridimensional do objeto sendo representado.

Rössl (2000) utiliza campos de curvaturas principais para criar linhas paralelas no espaço da imagem. O algoritmo exige um pré-processamento para extrair de toda a malha do objeto informações como direções das curvaturas principais e normais. O restante do algoritmo consiste em três etapas:

- Primeiro, é fixado um ponto de vista. A partir desse frame, as informações da geometria visível são armazenadas em *framebuffers* especiais (semelhantes aos *G-buffers* apresentados por Saito (1990));
- As informações armazenadas são utilizadas para ajudar o usuário a segmentar a imagem do objeto em regiões onde há uma forte coerência dos campos direcionais das curvaturas principais;
- A segmentação é feita pelo usuário esboçando linhas nas bordas das regiões desejadas; para auxiliar na decisão da escolha das regiões, é apresentada uma imagem LIC (do inglês, *Line Integral Convolution*) para que o usuário visualize o campo de curvatura máxima; sobreposta a essa imagem são aplicadas linhas de silhueta extraídas com as normais armazenadas que servem como segmentação inicial (Figura 2.26);

- Após a segmentação, o usuário especifica pontos em cada região; esses pontos serão integrados ao longo da direção de curvatura mínima para formar o esqueleto das linhas de desenho;
- Em intervalos homogêneos ao longo de cada esqueleto, pontos são integrados ao longo da direção de curvatura máxima para gerar as linhas finais de desenho;
- Com as linhas criadas, é usado mapeamento de tons a partir de uma imagem do modelo criada com iluminação realística para definir a espessura das linhas; a espessura de cada linha é definida para representar o tom da região correspondente na imagem sombreada.

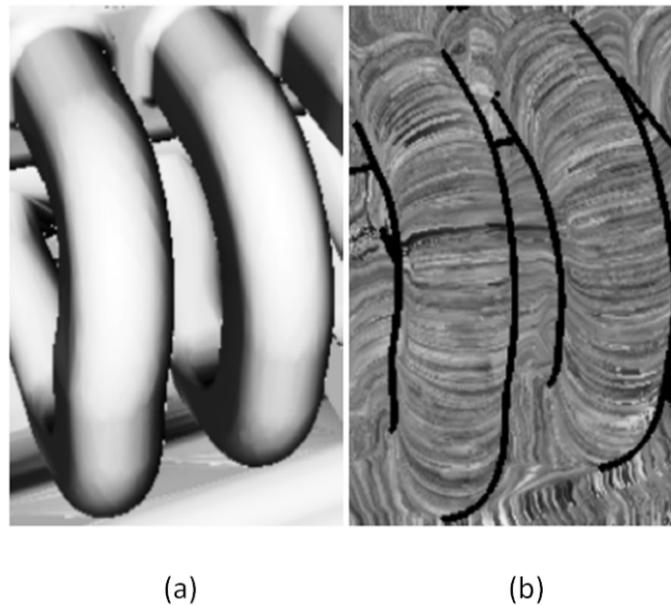


Figura 2.30: Imagem gerada com iluminação e sombreado (a) e imagem LIC com linhas de silhueta (b). (RÖSSL, 2000)

Por trabalhar no campo da imagem, essa técnica sofre de problemas de discretização dos campos direcionais que podem causar artefatos visuais. Para contornar esse problema, o autor permite que, em casos onde há problemas nos campos direcionais, o usuário crie as linhas por um método diferente: o usuário seleciona alguns pontos da curva de esqueleto; esses pontos são integrados normalmente ao longo da direção de curvatura máxima, criando linhas-chave; o restante das linhas é calculado através da interpolação dessas linhas-chave (Figura 2.27). Alguns problemas ainda persistem, como a criação de efeitos de padrões devido à regularidade do espaçamento e espessura das linhas. A Figura 2.28 mostra o resultado dessa técnica.

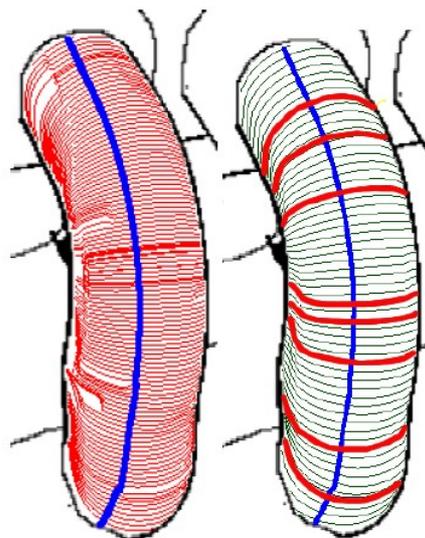


Figura 2.31: À esquerda, há problemas de discretização no campo direcional de curvatura máxima (em vermelho). À direita o usuário seleciona interativamente algumas linhas-chave (em vermelho) e as linhas restantes (em verde) são calculadas por interpolação. (RÖSSL, 2000)

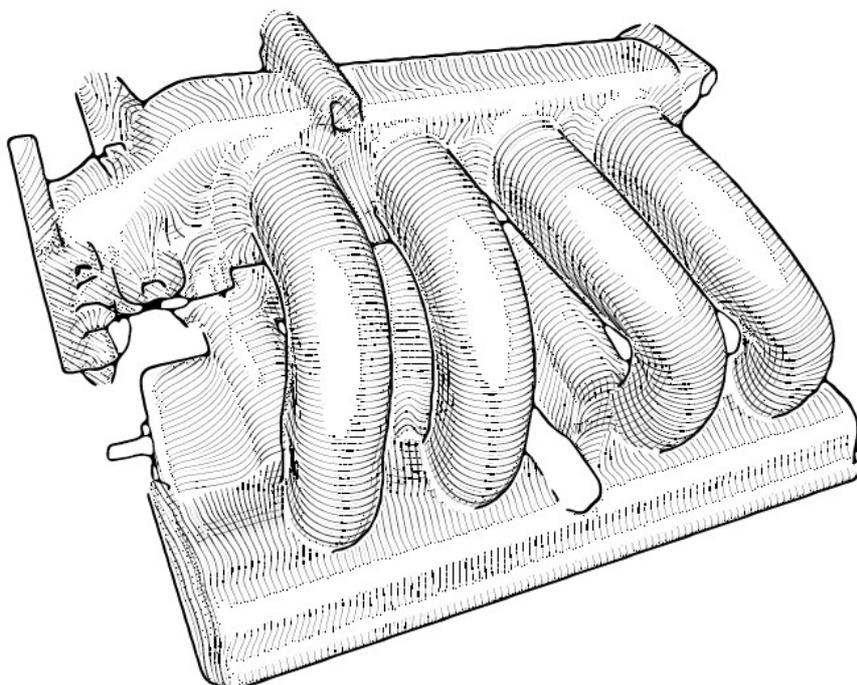


Figura 2.32: Resultado obtido com a técnica de Rössl (2000).

Outra abordagem é apresentada por Deussen (1999) que utiliza um método híbrido de operações no espaço da imagem e no espaço do objeto. O algoritmo se baseia na extração de linhas de interseção entre o modelo e um conjunto de planos paralelos definidos ao longo de um eixo escolhido pelo usuário. As linhas de interseção são usadas

para definir as linhas finais do desenho. O algoritmo segue os seguintes passos (o modelo precisa ser previa e geometricamente segmentado):

- Inicialmente, um ponto de vista é escolhido e uma imagem do modelo é gerada com iluminação realística para se obter tons de sombreado que serão usados no passo final de mapeamento de tons;
- Então, para cada segmento, o usuário define um conjunto de planos de interseção; os planos são criados uniformemente ao longo de uma *spline* definida interativamente pelo usuário, ou para alguns modelos simples, calculada automaticamente pelo sistema;
- O modelo é desenhado sem iluminação em branco sobre um fundo preto (Figura 2.29a); essa imagem é usada para extrair a silhueta do modelo no espaço da imagem;
- Para cada plano, o modelo é desenhado novamente com as mesmas cores, mas com a inclusão de um plano de recorte na mesma posição do plano de interseção em consideração (Figura 2.29b); uma nova silhueta é extraída da imagem recortada e a diferença entre as silhuetas (Figura 2.29c) é armazenada como uma linha de desenho (Figura 2.29d);
- Após o cálculo de todas as linhas, suas espessuras são moduladas através de um mapeamento de tons utilizando a primeira imagem gerada.

Como os planos são distribuídos uniformemente pelo eixo definido, artefatos de padrões podem surgir. A Figura 2.30 mostra o resultado dessa técnica.

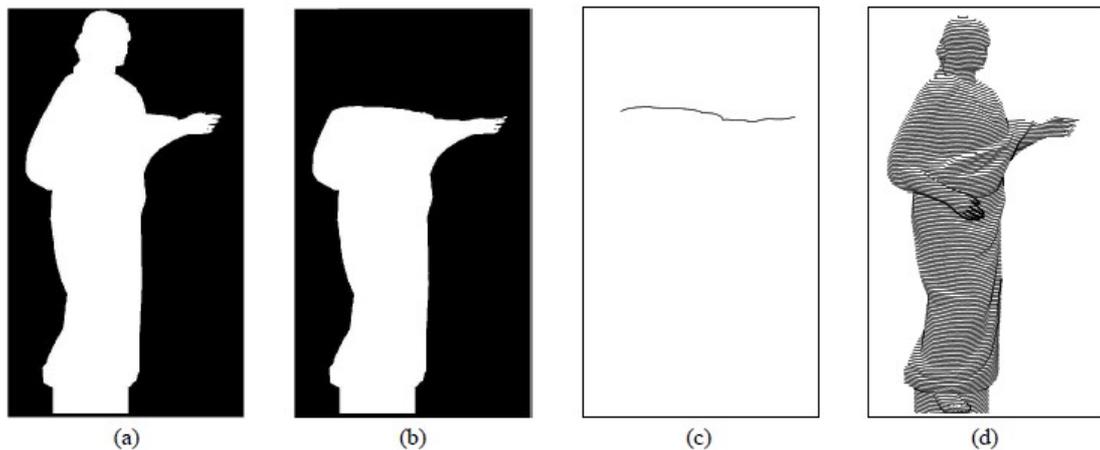


Figura 2.33: Passos do algoritmo de Deussen (1999).



Figura 2.34: Resultado obtido com a técnica de Deussen (1999).

Ritter (2006) aplica texturas na visualização de estruturas vasculares para acentuar a percepção de profundidade, utilizando linhas de contorno mais grossas para representar partes da estrutura mais próximas do observador e linhas mais finas para partes mais distantes (Figura 2.31). Linhas também são usadas para representar sombras que indicam a distância entre estruturas que se sobrepõem no plano de visualização (Figura 2.32). Outros tipos de textura também são usados para melhorar a percepção de importantes propriedades vasculares como nível de ramificação e área de suprimento.

Os métodos apresentados por Deussen e Rössl dão ao ilustrador um pouco mais de controle sobre a imagem gerada através da manipulação da direção das linhas de desenho (Deussen) ou de uma segmentação interativa da imagem (Rössl) quando comparadas aos métodos que criam as linhas automaticamente sobre o modelo seguindo propriedades da superfície sem o controle do usuário (seção 2.3.2). Apesar disso, esses trabalhos geram linhas no espaço da imagem, restritas a um ponto de vista, e as linhas criadas por Rössl sofrem de problemas de discretização do campo vetorial utilizado. Ambos os trabalhos não permitem a criação de nenhum tipo de efeito com as linhas além do sombreado baseado na iluminação. O trabalho de Ritter utiliza as linhas para gerar efeitos de percepção de profundidade e distância entre partes de uma estrutura, mas a geração das linhas é automática.

2.4 Comentários finais

Neste capítulo, foram revisados conceitos importantes relacionados à percepção visual, empregados por ilustradores para ampliar o reconhecimento e a interpretação de características em ilustrações. Em especial foi descrito o método de *perspective contouring*, escolhido como base do trabalho aqui desenvolvido.

Foram também revisados os trabalhos relacionados, sendo observado que um dos aspectos mais importantes para ampliar o poder de comunicação das ilustrações é a utilização de uma forma de trazer o foco de atenção do observador para as porções importantes dos objetos.

Os próximos capítulos descrevem a adaptação da técnica de *perspective contouring* como uma ferramenta para a produção de ilustrações baseadas em linhas a partir de modelos geométricos.

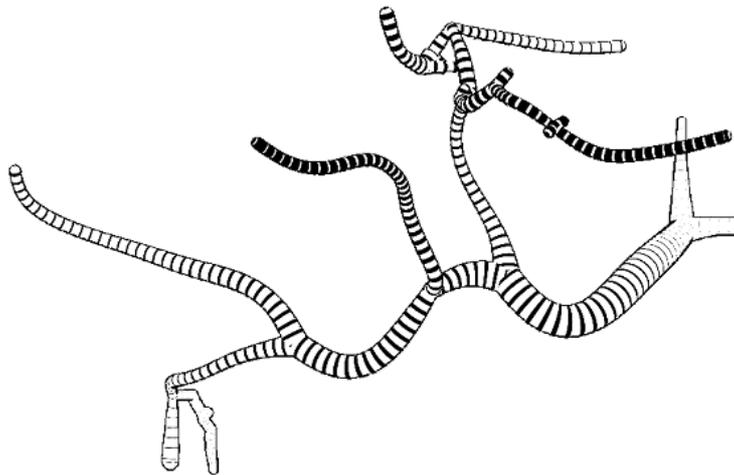


Figura 2.35: Codificação da distância de estruturas vasculares para o observador. Linhas mais grossas indicam uma distância menor para do observador. (RITTER, 2006)

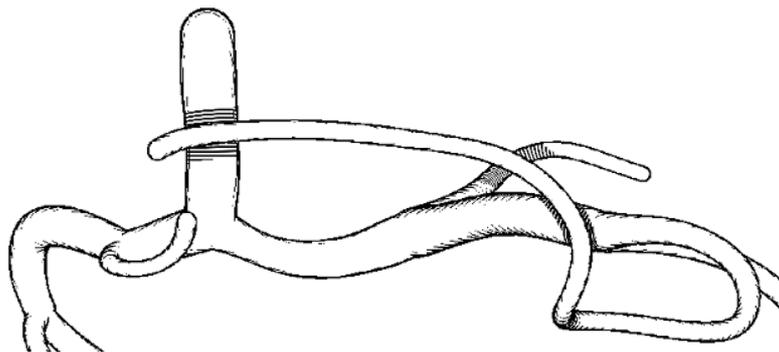


Figura 2.36: Linhas usadas para representar sombra entre dois segmentos vasculares que se sobrepõem. O tamanho da sombra indica a distância em profundidade entre os dois segmentos que se sobrepõem. (RITTER, 2006)

3 VISÃO GERAL DO MÉTODO DESENVOLVIDO

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma visão geral do método desenvolvido. O método permite a criação de ilustrações com linhas a partir de modelos geométricos tridimensionais utilizando *perspective contouring* para criação de ênfase. Curvas esboçadas pelo usuário são utilizadas para controlar a criação da ilustração de maneira simples e interativa.

3.2 Processo de criação de ilustrações

As ilustrações são compostas por dois conjuntos de linhas: linhas de contorno, que são utilizadas como linhas combinadas (seção 2.2.5) para representar a superfície do modelo através de *hatching*; e linhas de silhueta, que agem como linhas de bordas (seção 2.2.4) para aumentar a percepção da forma do objeto. Ambos os grupos de linhas são afetados pelas regras de construção do *perspective contouring* (seção 2.2.7).

Para modelar as linhas de contorno, são utilizadas seções extraídas da geometria do modelo. Essa abordagem gera linhas no espaço do objeto que podem ser posteriormente manipuladas para gerar diferentes estilos. Utilizando seções do modelo, pode-se obter uma representação exata do contorno do objeto, e evitam-se problemas de consistência em animações.

As seções são obtidas através da interseção de um conjunto de planos com a geometria do objeto. Para orientar os planos, uma curva paramétrica, esboçada pelo usuário sobre o modelo (Figura 3.1), é usada como eixo. Os planos são distribuídos uniformemente de maneira perpendicular ao eixo, e o usuário pode definir um ou mais eixos para o mesmo objeto, cada um tendo seu próprio conjunto de planos. Mais detalhes sobre a extração das seções são apresentados na seção 4.2.

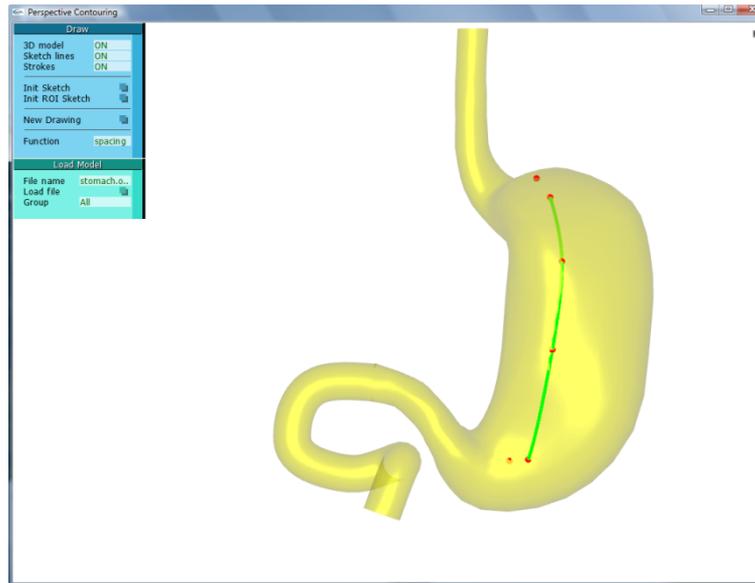


Figura 3.37: Primeiro passo interativo da construção da ilustração. Usuário define curva de eixo através de esboço (em verde) sobre o modelo.

A extração das linhas de silhueta é feita utilizando-se uma estrutura especial chamada malha de silhuetas, que mantém todas as possíveis arestas da silhueta. Em cada aresta dessa malha é armazenado um *patch* de dois triângulos que pode ser desenhado para formar um segmento da linha de silhueta. A malha de silhueta é criada em um passo de pré-processamento com base na malha original. A determinação de quais arestas são desenhadas é feita em tempo real à medida que o usuário interage com o modelo e modifica o ponto de vista. A construção da malha de silhuetas é detalhada na seção 4.4.

Com a malha de silhuetas criada e as seções do objeto extraídas, o usuário pode definir regiões de interesse (ROIs, do inglês, *regions of interest*) onde deseja aplicar ênfase. Essa definição é feita através de uma interface baseada em esboço (do inglês, *sketch-based interface*) onde o usuário desenha uma curva fechada sobre a região escolhida no modelo (Figura 3.2). A curva esboçada é utilizada não só para determinar a região de ênfase no modelo, mas também para determinar o formato do efeito de *highlight* desejado (modulação do comprimento das linhas de contorno). O centro da região envolta na curva de *highlight* é definido como o local por onde passa a linha de horizonte interno utilizada na construção das linhas de desenho.

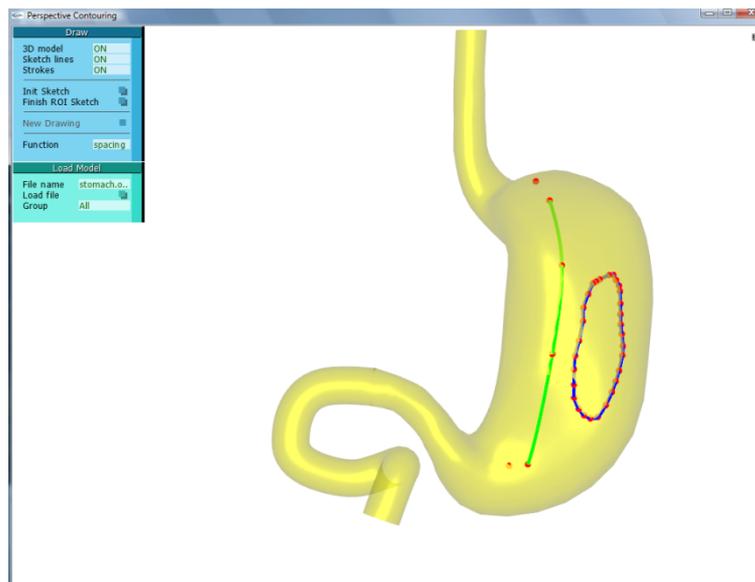


Figura 3.38: Segundo passo interativo da criação da ilustração. Usuário define a ROI com uma curva de *highlight* (em azul) esboçada sobre o modelo.

As linhas de contorno e de silhueta que geram o desenho final são criadas a partir das estruturas geométricas pré-processadas e desenhadas como faixas de triângulos (do inglês, *triangle strip*). O posicionamento e espessura das linhas de contorno, assim como a espessura dos segmentos das linhas de silhueta dentro de cada ROI são definidos de acordo com as regras de construção do *perspective contouring*. Os atributos das linhas fora das ROIs podem ser livremente ajustados pelo usuário para se obter o efeito desejado. Esse ajuste é feito através de gráficos que mapeiam curvas desenhadas pelo usuário em valores de atributos das linhas ao longo da curva de eixo do objeto (Figura 3.3). O capítulo 5 descreve como o *hatching* é composto através da aplicação das regras de construção. A Figura 3.4 apresenta os passos executados no processo de criação de uma ilustração no sistema desenvolvido.

Para a implementação do método foi utilizada linguagem C++, biblioteca OpenGL e GLSL para *shaders*. A interface de controle (menus e botões) foi construída utilizando a biblioteca AntTweakBar (ANTTWEAKBAR, 2008). Os modelos geométricos utilizados são representados por malhas de triângulos, e armazenados em arquivos com formato OBJ (OBJECT, 2008).

3.3 Comentários finais

Neste capítulo foram apresentados os principais passos na criação de uma ilustração baseada em linhas com efeito de ênfase utilizando o sistema desenvolvido.

Os próximos dois capítulos abordam em detalhe as técnicas desenvolvidas. O capítulo 4 descreve as estruturas geométricas utilizadas enquanto o capítulo 5 descreve a composição do *hatching* propriamente dita.

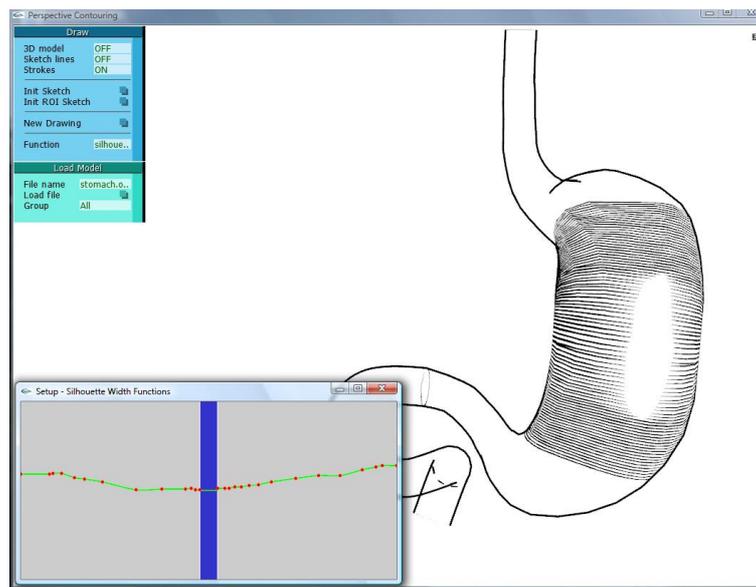


Figura 3.39: Terceiro passo interativo da criação da ilustração. Usuário ajusta propriedades das linhas de desenho fora da ROI através de curvas de função. As curvas usadas para ajustar a espessura das linhas de silhueta são exibidas em verde.

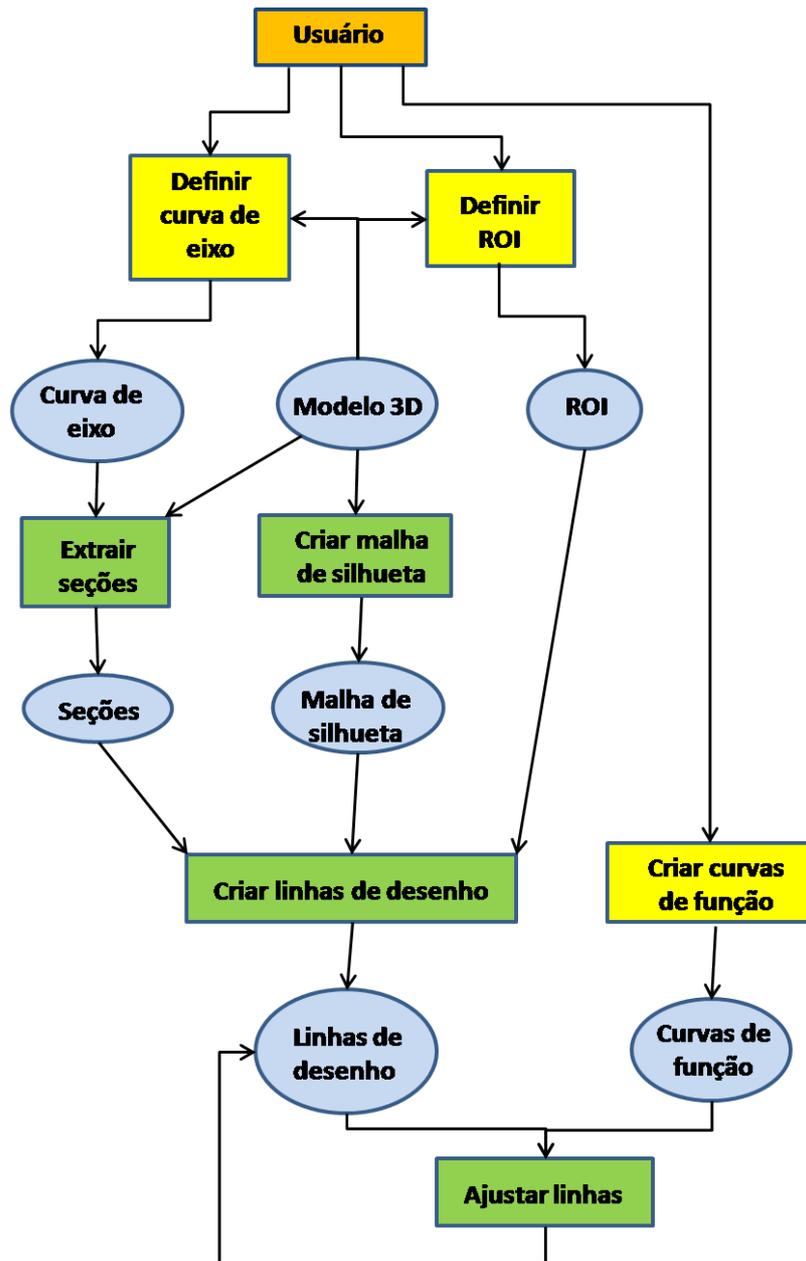


Figura 3.40: Processo de criação de uma ilustração. As caixas em verde representam ações executadas no sistema que podem ter como entrada tanto resultados de outras ações (em elipses azuis) quanto interação direta do usuário (caixas amarelas).

4 ESTRUTURAS GEOMÉTRICAS

Neste capítulo descrevemos as estruturas geométricas envolvidas no processo de criação das ilustrações, desde as curvas esboçadas pelo usuário na interação com o sistema, até as estruturas que modelam as linhas de contorno e de silhueta.

4.1 Curvas de esboço

Linhas de construção são linhas utilizadas pelos ilustradores para ajudar no processo de criação de uma ilustração. As linhas podem ser usadas para indicar formas, volumes, tamanhos, mas no decorrer da composição do desenho vão sendo apagadas e não fazem parte do desenho final (Figura 4.1).

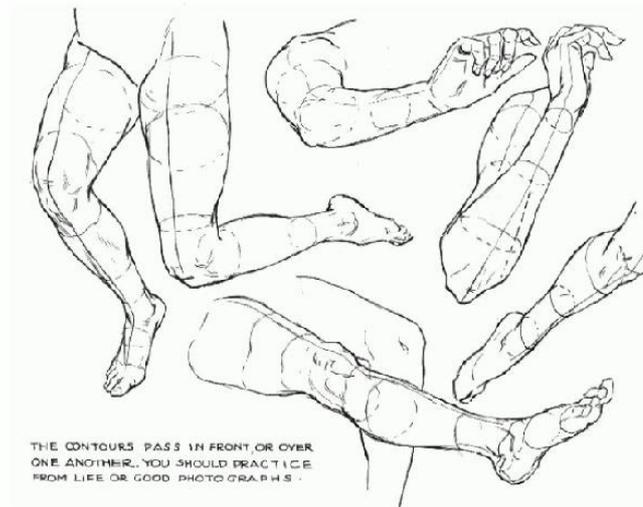


Figura 4.41: Exemplos de linhas de construção (tracejado) usadas na ilustração tradicional para indicar forma e volume de braços e pernas (GOLDSTEIN, 1999).

Inspirada nesse conceito, a interação do usuário para determinar como a ilustração será criada no sistema desenvolvido é feita através de uma interface baseada

em esboço. Com essa abordagem, o usuário pode ter uma interação mais natural e intuitiva.

As curvas de esboços são usadas em três situações. Primeiro, quando o usuário determina a orientação dos planos usados na extração das seções do modelo. A orientação é perpendicular a uma curva desenhada pelo usuário sobre o modelo. Essa curva também delimita a extensão do modelo que será usada no desenho final, já que regiões do modelo que não forem intersectadas pelos planos não serão representadas na criação das linhas de contorno. Assim, com uma mesma curva, o usuário determina qual região do modelo se quer ver desenhada e a direção das linhas de contorno. O sistema permite a criação de várias curvas de eixo para um mesmo modelo, cada curva tendo seu próprio conjunto de planos e seções extraídas.

A segunda situação acontece quando o usuário determina as ROIs do modelo, regiões onde as linhas de contorno e silhueta são criadas de maneira diferente para gerar um efeito de ênfase. A determinação é feita através de uma curva fechada desenhada sobre a região do modelo escolhida. A curva não só determina a ROI, mas também o formato do efeito de *highlight* pretendido. A definição da ROI é detalhada na seção 5.1.

O terceiro caso onde o esboço é utilizado ocorre no ajuste dos atributos das linhas fora das ROIs. Como os atributos das linhas dentro das ROI são determinados pelas regras de construção do *perspective contouring*, o usuário pode definir como o restante das linhas será desenhado através do esboço de curvas em painéis especiais que mapeiam a extensão da curva de eixo em sua horizontal e os valores dos atributos das linhas na vertical. Detalhes sobre essa interação são apresentados na seção 5.2.2.

Todas as curvas citadas acima são representadas como curvas paramétricas *b-spline*. Para a obtenção da curva paramétrica, foi adotada uma abordagem inspirada no trabalho de Cherlin (2005) que utiliza subdivisão recursiva de Chaikin (1974) para filtrar os pontos retornados pelo dispositivo de entrada, como, por exemplo, um mouse, e obter os pontos de controle da *b-spline*.

Cada linha de esboço começa como um conjunto de pontos capturados diretamente do dispositivo de entrada no plano da imagem. Esse conjunto de pontos é ordenado e pode ser visto como uma curva paramétrica, porém, há desvantagem na utilização dessa curva. Primeiro, os pontos são bastante ruidosos devido a variações no manuseio do dispositivo de entrada. Segundo, os pontos estão distribuídos irregularmente ao longo da curva devido a variações na velocidade do traçado. Finalmente, pode haver um número muito grande de pontos, em função da frequência de amostragem do dispositivo de entrada.

Para evitar esses problemas, obtemos uma curva *b-spline* que se encaixe nesse conjunto de pontos. Através da subdivisão reversa de Chaikin podemos encontrar uma

curva *b-spline* sem ruídos e com um número pequeno de pontos de controle regularmente espaçados (Figura 4.2).

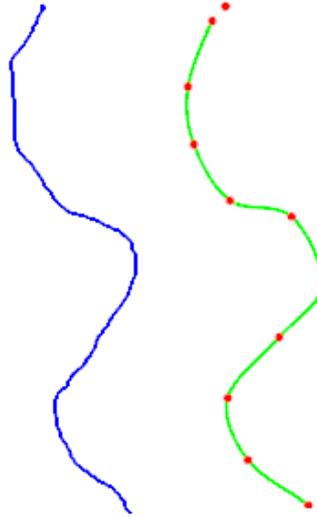


Figura 4.42: Captura do esboço. À esquerda, esboço não filtrado; à direita, esboço final com pontos de controle após a subdivisão reversa de Chaikin ter sido aplicada três vezes.

Usando um esquema de subdivisão reversa podemos decompor um conjunto fino de pontos em uma aproximação mais esparsa. Como a subdivisão de Chaikin é baseada em uma *B-spline* quadrática, podemos assumir a informação mais esparsa como pontos de controle de uma curva *B-spline* quadrática.

Se definirmos os pontos finos como p_0, p_1, \dots, p_n e os pontos esparsos como q_0, q_1, \dots, q_m então, o caso geral da subdivisão reversa de Chaikin é dado por:

$$q_j = \frac{-1}{4} p_{i-1} + \frac{3}{4} p_i + \frac{3}{4} p_{i+1} - \frac{1}{4} p_{i+2} \quad ,$$

onde o tamanho do passo de i é dois. A cardinalidade dos pontos esparsos é quase metade dos pontos finos. Cada vez que a subdivisão é aplicada a curva se torna mais suave, porém se afasta cada vez mais da curva original. Para os propósitos deste trabalho, executar a operação três vezes é o suficiente para se eliminar o ruído sem se afastar muito da curva original (Figura 4.2).

4.2 Curvas de seção

Para criar linhas de contorno de um objeto, Ross1 (2000) utiliza uma estrutura no espaço da imagem que se assemelha a uma espinha de peixe que integra linhas ao longo da direção de curvatura máxima (Figura 2.27). Esse método sofre de problemas de discretização do campo direcional e gera apenas uma imagem de um determinado ponto

de vista. Deussen (1999) utiliza um método híbrido que faz operações no espaço do objeto, através da interseção de um conjunto de planos com a malha do objeto, mas gera linhas no espaço da imagem (Figura 2.29). Esse método, por utilizar diretamente a geometria do objeto consegue linhas de contorno mais precisas, mas ainda é necessária a extração das linhas para cada ponto de vista diferente.

Um fator importante no sistema proposto é a possibilidade do usuário interagir com a ilustração livremente, podendo inclusive observá-la de pontos de vista diferentes. Assim, neste trabalho, obtemos as linhas analiticamente no espaço do objeto. Essa abordagem também permite um posterior controle das propriedades das linhas (como comprimento e espessura), permitindo a aplicação de estilos de linhas diferentes, e gera linhas consistentes mesmo quando o usuário altera o ponto de vista do desenho na interface do sistema.

A obtenção das linhas de contorno é feita através da extração de seções da malha de triângulos do objeto da ilustração. Isso permite a criação de linhas de contorno do objeto tão exatas quanto a malha utilizada para representá-lo.

Cada seção é representada como uma curva paramétrica, cujos pontos de controle são obtidos através do resultado da interseção das arestas da malha do objeto com um plano. Para orientar os planos utilizados na extração das seções, o usuário desenha uma curva sobre o modelo que serve como um eixo para os planos de interseção que são orientados perpendicularmente ao longo dela (Figura 4.3). Para detalhes sobre a captura das curvas esboçadas pelo usuário, ver seção 4.1.

Dada uma malha de triângulos com uma ou mais curvas de eixo, o processo de extração das seções se dá da seguinte maneira para cada curva:

- Primeiro, vários pontos são amostrados ao longo da curva de eixo; em cada ponto, é calculada a tangente da curva que é, então, utilizada pra definir o plano de interseção;
- Para cada plano, é calculada sua interseção com as arestas da malha do objeto; os pontos de interseção encontrados são utilizados como pontos de controle para gerar uma curva paramétrica da seção.

Caso o plano intercepte mais de uma vez a malha, gerando mais de uma curva de seção, é calculada a média dos pontos de controle de cada curva, e a curva com a média mais próxima do ponto da curva de eixo utilizado na definição do plano é escolhida como a seção válida.

As curvas de seção extraídas servirão de guias para a modelagem das linhas de contorno. As propriedades das linhas de contorno, como posicionamento (ao longo da curva de eixo), espessura e comprimento, só serão definidas quando o usuário determinar as ROIs do objeto e as regras de construção do *perspective contouring* forem aplicadas. Como as curvas de seção são uma representação discreta da malha do objeto,

linhas de contorno que sejam posicionadas entre duas curvas de seção utilizam uma interpolação das duas curvas.

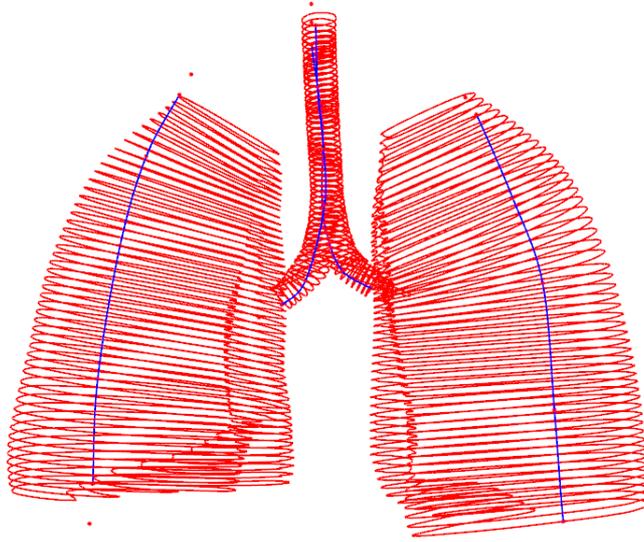


Figura 4.43: Curvas de seção (em vermelho) extraídas de uma malha representando pulmões e traqueia. Curvas de eixo utilizadas são desenhadas em azul.

4.3 Linhas de contorno

Linhas de contorno são utilizadas para representar a superfície do objeto e dar a percepção de volume ao desenho. As linhas são utilizadas em conjunto para criar um *hatching*, onde a percepção do todo, no caso a percepção de uma superfície contínua, prevalece sobre a percepção das linhas individuais. Na técnica do *perspective contouring*, as propriedades das linhas de contorno são manipuladas para criar efeitos de realce de certas regiões do objeto, fazendo com que essas regiões pareçam avançar em direção ao observador.

No sistema desenvolvido, as linhas de contorno são modeladas como faixas de triângulos que seguem as curvas de seção extraídas da malha do objeto. As linhas de contorno são criadas após o usuário definir uma ROI no objeto e suas propriedades, como posicionamento (ao longo da curva de eixo), espessura e comprimento são definidas pelas regras de construção do *perspective contouring*, pela curva de *highlight* definida pelo usuário para a ROI correspondente e pelas curvas de função para linhas que se encontram fora das ROIs.

Após a definição das propriedades das linhas pelos elementos apresentados acima, cada linha é modelada em torno da curva de seção correspondente conforme o algoritmo 4.1 (Figura 4.4).

- Alguns pontos são amostrados da curva de seção. Esses pontos servirão de base para os vértices da faixa de triângulos.
- Para cada ponto amostrado, dois vértices são criados. Os vértices são criados deslocando-se cópias do ponto amostrado em sentidos opostos, na direção perpendicular ao plano da seção.
- A magnitude do deslocamento dos vértices depende da espessura definida para a linha.
- Para quebrar a regularidade das linhas e dar um efeito artístico ao traçado, são aplicadas pequenas variações aleatórias no deslocamento dos vértices.
- Os vértices criados são unidos para formar uma faixa de triângulos.
- Os triângulos recebem a cor preta para serem desenhados em fundo branco, gerando uma visualização similar às ilustrações com linhas tradicionais feitas em papel. Os triângulos que pertencem ao *highlight* (segmento da curva de seção dentro da área definida pela curva de *highlight*) recebem a cor branca para não serem visíveis no desenho final.
- Para suavizar a transição das linhas ao *highlight*, a espessura da faixa de triângulos é reduzida de maneira gradual à medida que se aproxima do ponto de transição (onde a linha em preto é interrompida e começa o *highlight*).

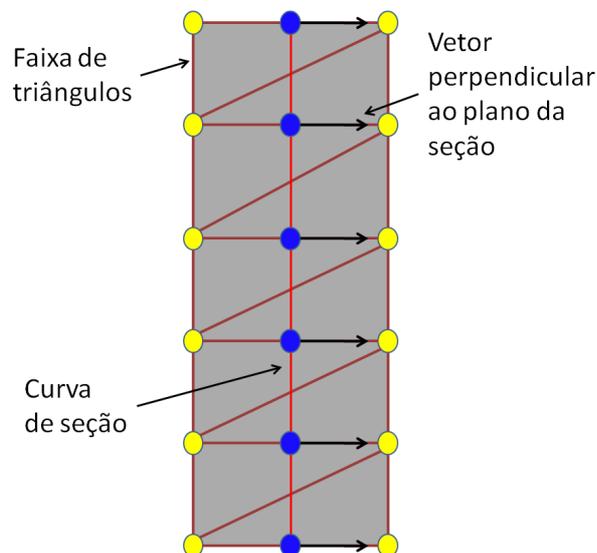


Figura 4.44: Construção de uma linha de contorno. Faixa de triângulos (cinza) é criada com vértices (amarelo) deslocados de pontos (azul) da curva de seção (vermelho) na direção perpendicular (preto) ao plano da seção, mas em sentidos opostos. O deslocamento é definido principalmente pela espessura definida para a linha.

4.4 Linhas de silhueta

Linhas de silhueta são usadas para definir a forma geral de um objeto e destacá-lo do plano de fundo. Ilustrações com silhuetas conseguem de forma bastante simples e eficiente representar objetos, quando o detalhamento da superfície não é importante ou não desejado, como no caso de informação de contexto para outros objetos que são desenhados com mais detalhes. As silhuetas são bastante importantes para melhorar a percepção da forma do objeto, e através da estilização da linha podem criar efeitos interessantes como percepção de profundidade, sombreamento e ênfase.

Na técnica do *perspective contouring*, as linhas de silhueta são manipuladas para realçar regiões do objeto através da modulação da sua espessura, criando um efeito de avanço da região em direção ao observador.

A silhueta de um objeto pode ser definida como todos os pontos de sua superfície cujos vetores normais são perpendiculares ao vetor de visualização. Para modelar a silhueta de uma malha de triângulos podemos simplificar esse conceito e dizer que uma aresta faz parte da silhueta se ela é compartilhada por uma face frontal e uma face traseira (uma face frontal tem uma normal cujo produto escalar com o vetor de visualização é negativo enquanto que em uma face traseira o produto escalar é positivo).

A modelagem utilizada é uma adaptação do método proposto por McGuire (2004). Em uma etapa de pré-processamento, criamos uma estrutura chamada de malha de silhueta, que armazena todas as arestas que possam vir a pertencer à silhueta em algum momento da interação do usuário com a ilustração em criação. A decisão de quais arestas serão desenhadas é feita em tempo de execução e depende do ponto de vista escolhido pelo usuário.

Para criar a malha de silhueta, percorremos cada aresta da malha original do objeto e para cada uma, criamos quatro vértices na malha de silhueta (Figura 4.5). Esses vértices (V_1' , V_1'' , V_2' e V_2'') recebem (dois a dois) as posições dos vértices originais (V_1 e V_2) e armazenam as normais das duas faces que compartilham a aresta da malha original (N_{f1} e N_{f2}). Também armazenamos as normais dos vértices originais nos novos vértices correspondentes (N_1 para V_1' e V_1'' , e N_2 para V_2' e V_2'').

Os novos vértices criados são usados para criar um par de triângulos (semelhante a um segmento da faixa de triângulos usada nas linhas de contorno) que pode ser desenhado representando um segmento da linha de silhueta. As informações de normais das faces serão usadas em tempo de execução para determinar se a aresta pertence à silhueta atual e, portanto, deve ser desenhada. Como os quatro vértices são armazenados em apenas duas posições diferentes, os triângulos são, inicialmente, degenerados em um segmento de linha. As normais dos vértices originais são utilizadas para deslocar os vértices da malha de silhueta e tornar os triângulos visíveis caso eles façam parte da silhueta e devam ser desenhados. A magnitude do deslocamento é relacionada com a

espessura da linha de silhueta definida pelas regras de construção do *perspective contouring* após a definição de uma ROI pelo usuário.

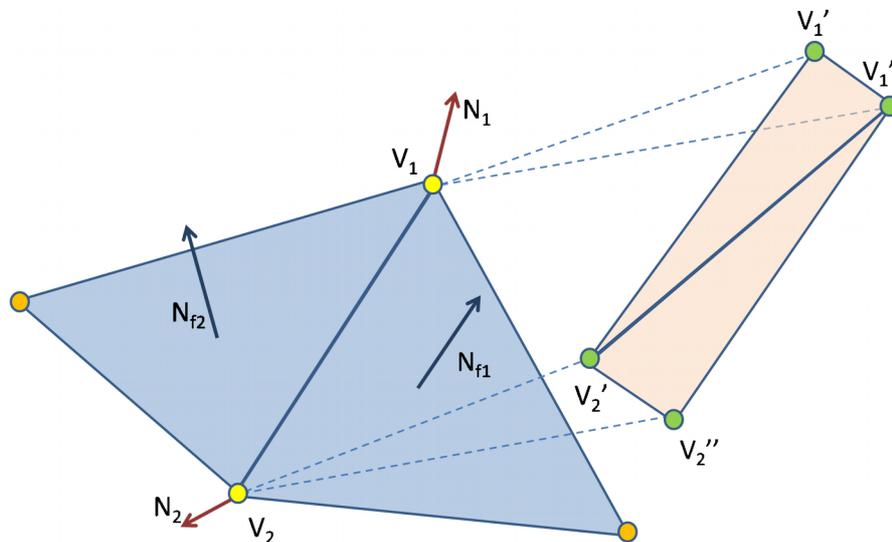


Figura 4.45: Criação de uma aresta da malha de silhueta. Dada uma aresta da malha do objeto ($V_1 - V_2$), dois vértices são criados a partir de cada vértice da malha original (V_1' , V_1'' , V_2' e V_2''). Os novos vértices formam um par de triângulos que são desenhados representando um segmento da linha de silhueta.

Para que no passo de composição do *hatching* (capítulo 5), seja possível definir a espessura das linhas de silhueta, é preciso calcular a distância dos vértices da malha de silhueta para o centro da ROI. Para isso, armazenamos em cada vértice da malha de silhueta o ponto mais próximo da curva de eixo definida pelo usuário. Caso existam mais de uma curva de eixo, armazena-se o ponto mais próximo entre todas as curvas. Esse ponto será usado para calcular a distância em comprimento de arco até o ponto na curva que corresponde ao centro da ROI.

4.5 Comentários finais

As estruturas geométricas apresentadas neste capítulo armazenam informações sobre o modelo a ser desenhado, que serão utilizadas pelos processos apresentados no capítulo 5 para a criação das linhas de desenho, e sobre as primitivas utilizadas no desenho final. Estruturas como as curvas de seção e a malha de silhueta são

transparentes ao usuário que lida apenas com a malha do objeto, as curvas esboçadas sobre ele, e as linhas de desenho geradas como resultado.

5 COMPOSIÇÃO DO *HATCHING*

Neste capítulo apresentamos como o *hatching* é formado através das regras de construção do *perspective contouring*, para a criação de ilustrações com linhas e efeitos de ênfase em regiões determinadas pelo usuário. Também apresentamos como a silhueta é afetada pelas regras e o seu processo de desenho.

5.1 Introdução

Na ilustração tradicional, o *perspective contouring* consiste em definir uma linha de horizonte interno, geralmente perpendicular ao eixo mais longo do objeto a ser desenhado, onde será desenhada uma região do objeto onde se quer dar o efeito de proximidade ao observador, chamando assim sua atenção para aquela região. A partir da linha de horizonte interno, o ilustrador desenha linhas de contorno e silhueta do objeto, dando forma e volume ao desenho. Para gerar o efeito de realce nas regiões em volta da linha de horizonte interno, o ilustrador segue as seguintes regras de construção para as linhas de contorno e silhueta:

- Linhas de contorno mais próximas da linha de horizonte interno são:
 - Mais grossas;
 - Mais espaçadas umas das outras;
 - Mais curtas (gerando efeito de *highlight* (linhas abertas));
- Linhas de contorno mais distantes da linha de horizonte interno são:
 - Mais finas;
 - Mais próximas umas das outras;
 - Mais compridas (sem efeito de *highlight*).
- As linhas de silhueta devem ser mais finas quando próximas da linha de horizonte interno e mais grossas à medida que se afastam dela.

Na abordagem utilizada neste trabalho, procuramos uma maneira simples e intuitiva de permitir ao usuário a definição das regiões do objeto em que deseja dar ênfase. Inspirados na idéia das “linhas de construção”, como a linha de horizonte interno, que são linhas usadas para auxiliar os ilustradores na construção de uma

ilustração, mas são descartadas do desenho final, utilizamos uma interface baseada em esboço para permitir ao usuário desenhar sobre o objeto e indicar as ROIs.

Uma vez determinadas as ROIs, as linhas de contorno e silhueta são automaticamente calculadas e desenhadas para o usuário, seguindo as regras do *perspective contouring*, poupando trabalho e tempo ao ilustrador na criação desse tipo de ilustração. Nas seções seguintes detalhamos como a definição das ROIs é feita, e como as linhas de contorno e silhuetas são calculadas.

5.2 Definição de uma ROI

Para definir uma ROI, o usuário esboça uma curva fechada sobre a superfície da malha do objeto (seção 4.1). A curva esboçada define não somente a ROI, mas também o *highlight* usado na criação das linhas de contorno. O *highlight* consiste na região interna definida pela curva (Figura 5.1).

Internamente, a ROI é definida pelo conjunto das curvas de seção (seção 4.2), previamente extraídas do modelo, que são interceptadas pela curva de *highlight*. Isso significa que as linhas de contorno que são criadas por essas seções são afetadas pelas regras de construção. As linhas de contorno que são criadas pelas seções fora da ROI podem ser ajustadas pelo usuário através da interface para entrada das curvas de função.

O conjunto de seções da ROI também define as arestas da silhueta que são afetadas pelas regras de construção através dos pontos da curva de eixo associados com os vértices das arestas.

A seção central do conjunto pertencente à ROI é a seção que representa a linha de horizonte interno usada na ilustração tradicional, e as regras de construção são baseadas no posicionamento dessa seção.

Cada ROI é associada a uma curva de eixo, e às seções geradas por essa curva. Para determinar qual curva de eixo deve ser usada, calcula-se a curva com ponto de controle mais próximo do centróide da curva de *highlight*. O sistema permite a criação de mais de uma ROI por curva de eixo, a única restrição é que os conjuntos de seções das ROI não se intersectem.

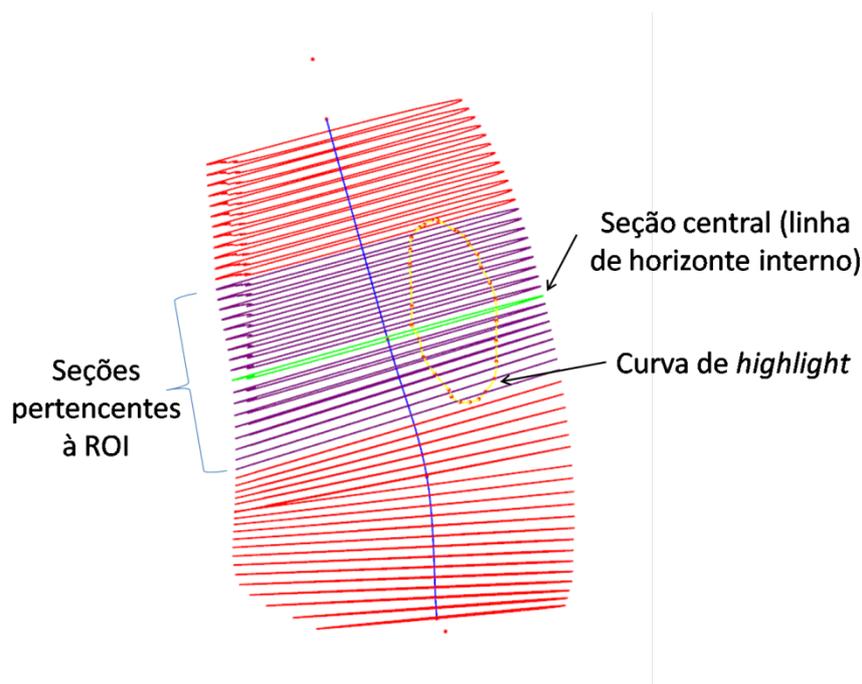


Figura 5.46: Definição de uma ROI. A curva de highlight esboçada pelo usuário sobre o modelo (amarelo) intersecta um conjunto de curvas de seção (roxo) da curva de eixo mais próxima (azul). A seção central (verde) é usada como linha de horizonte interno na técnica do *perspective contouring*.

5.3 Criação das linhas

Uma vez que o usuário tenha definido uma ROI, podem-se calcular as propriedades das linhas de contorno e silhueta baseadas nas regras de construção abordadas. A criação das linhas pode ser dividida em duas fases: linhas que se encontram dentro da região definida pelas seções da ROI, que se baseiam nas regras do *perspective contouring*, e linhas que estão fora da ROI e se baseiam em curvas de função desenhadas pelo usuário em painéis especiais para essa finalidade.

A criação das linhas de contorno é feita em duas etapas. Primeiro, cria-se as linhas dentro da ROI, onde se segue o algoritmo usado pelos ilustradores tradicionais e criam-se as linhas de contorno a partir da linha de horizonte interno e segue-se para as extremidades esquerda e direita da ROI. Depois, a partir das bordas da ROI continua-se o caminho em direção às extremidades da curva de eixo, utilizando as informações das curvas de função.

As linhas de silhueta não seguem o algoritmo sequencial usado na construção das linhas de contorno. Cada vértice da malha de silhueta é percorrido, e sua distância para a linha de horizonte interno (informação usada para calcular a espessura da linha) é definida pela distância do ponto na curva de eixo associado ao vértice ao ponto na

mesma curva associado à seção central da ROI que representa a linha de horizonte interno. Essa distância é usada ao invés da distância direta entre o vértice e o ponto associado à seção central na curva de eixo, pois, a distância entre os dois pontos na mesma curva é calculada em comprimento de arco, o que é importante para saber se o vértice se encontra dentro da ROI.

Encontrada a distância do vértice à linha de horizonte interno, pode-se descobrir se o vértice encontra-se dentro da ROI comparando-se essa distância com a distância da seção (na verdade do ponto na curva de eixo associado à seção) na borda da ROI para a seção central. Caso se encontre dentro da ROI, o vértice recebe uma espessura correspondente com as regras de construção, e se estiver fora, recebe a espessura de acordo com as curvas de função.

5.3.1 Cálculo das linhas dentro da ROI

Para modelar o comportamento das regras de construção do *perspective contouring*, são utilizadas funções lineares para definir o posicionamento e espessura das linhas de contorno e a espessura das linhas de silhueta. O comprimento das linhas de contorno já é definido pela curva de *highlight* esboçada pelo usuário na definição da ROI. Desta maneira o usuário tem a liberdade de definir o comprimento das linhas ao mesmo tempo em que segue as regras de construção que demandam linhas mais curtas próximo da linha de horizonte interno.

As funções recebem como entrada uma distância, sempre em termos de comprimento de arco da curva de eixo, para a seção que representa a linha de horizonte interno. No caso da silhueta, a distância é do ponto da curva de eixo mais próximo do vértice da malha de silhueta. Para as linhas de contorno, a distância é incrementada iterativamente à medida que as linhas vão sendo criadas e se distanciando da seção central.

As funções têm a forma:

$$value = sd + b,$$

onde, *value* é o valor a ser calculado (espessura para silhuetas, espaçamento e espessura para linhas de contorno), *d* é a distância de entrada, *s* e *b* são variáveis usadas para ajustar a função. Como o comportamento do espaçamento e espessura das linhas de contorno pelas regras é decrescente com o aumento da distância, usa-se um valor de *s* negativo, enquanto que para a espessura da silhueta, usa-se um *s* positivo.

Na criação das linhas de contorno, o processo se inicia a partir da seção central da ROI, e é repetido para a esquerda e para a direita da seção central. A cada linha criada, a distância *d* é atualizada com a nova espessura e novo espaçamento calculados. O processo de se criar uma linha é descrito abaixo e ilustrado na Figura 5.2:

- Calcular nova espessura;
- Atualizar d com metade da nova espessura;
- Encontrar curva de seção no ponto: seção central $- d$, quando calculando à esquerda da seção central, ou seção central $+ d$, caso contrário;
- Atualizar d com a outra metade da espessura calculada;
- Calcular novo espaçamento;
- Atualizar d com o novo espaçamento;

Os passos acima são repetidos até que se chegue à última seção pertencente à ROI, ou à extremidade da curva de eixo (última seção existente).

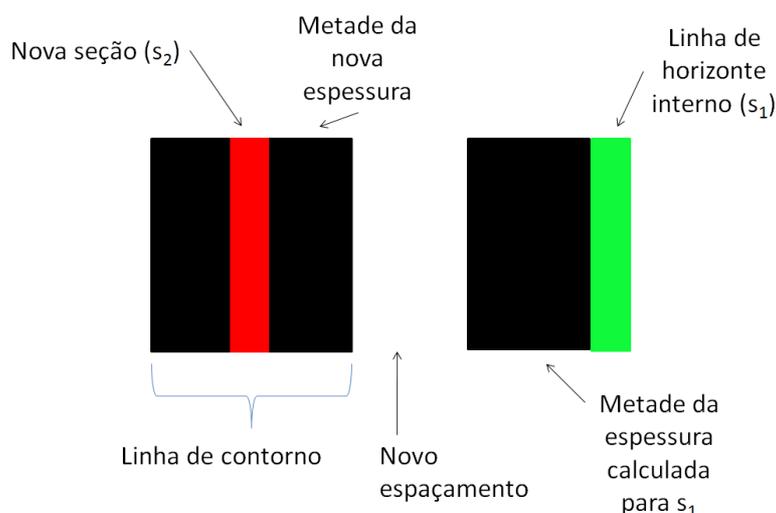


Figura 5.47: Processo de criação de linha de contorno (da direita para a esquerda).

5.3.2 Cálculo das linhas fora da ROI

O cálculo fora das ROIs se baseia em valores retornados por curvas esboçadas pelo usuário que fazem o papel da função utilizada no cálculo dentro das ROIs. O procedimento para as linhas de silhueta é o mesmo, apenas muda-se a função utilizada. Com as linhas de contorno, altera-se além das funções, o ponto de partida do cálculo, que agora se dá a partir das bordas esquerdas e direitas das ROIs, mas continuam em direção às extremidades.

As curvas usadas nesse cálculo são desenhadas pelo usuário em painéis como mostrados na Figura 5.3. Cada painel mapeia em sua coordenada horizontal, a curva de eixo, desde sua extremidade esquerda, passando pela ROI (ao centro dos painéis), até a extremidade direita. A altura de cada curva representa um valor para a função selecionada na interface principal. A linha verde ao centro dos painéis representa o valor

nas bordas das ROIs e serve de referência para que o usuário possa aumentar ou diminuir o valor da curva de acordo com o valor na borda da ROI.

Caso existam mais de uma ROI na mesma curva de eixo, são apresentados mais dois painéis ao lado dos primeiros com os mapeamentos horizontais correspondentes.

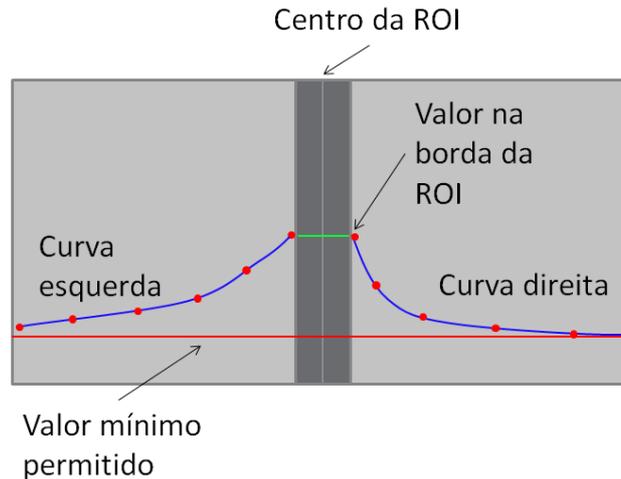


Figura 5.48: Interface de definição das curvas de função. Cada painel, em cinza claro, mapeia, na sua extensão horizontal, a curva de eixo desde a borda da ROI (ao centro) até as extremidades (laterais opostas dos painéis). Na extensão vertical, os painéis mapeiam os valores da função corrente.

5.3.3 Desenho da silhueta

O algoritmo utilizado para determinar quais arestas da malha de silhueta devem ser desenhadas consiste em, dado um ponto de vista escolhido pelo usuário, checar, para cada vértice da malha de silhueta, se os produtos escalares entre as duas normais das faces que compartilham a aresta (na Figura 4.5, N_{f1} e N_{f2}) e o vetor de visualização têm sinais diferentes (Figura 5.4).

A diferença nos sinais mostra que o vértice faz parte da silhueta e, portanto, deve ser desenhado. Para que isso ocorra, o vértice é deslocado na direção da normal do vértice original na malha do objeto (na Figura 4.5, N_1 e N_2). Ao fazer isso, os triângulos formados com esses vértices se tornam visíveis.

Caso o teste falhe, os vértices não são deslocados e os valores *alpha* das suas cores são modificados para evitar o desenho.

Os cálculos apresentados acima são feitos em tempo de execução no processador gráfico (GPU, do inglês, *graphics processing unit*). É utilizado um *shader* de vértices para testar todos os vértices da malha de silhueta e saber se fazem parte da silhueta no ponto de vista sendo usado no momento pelo usuário.

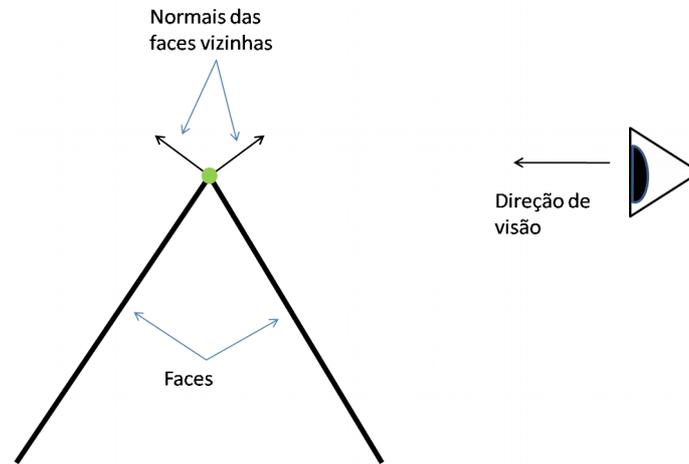


Figura 5.49: Desenho da linha de silhueta. Caso os vetores das faces que compartilham a aresta do vértice em consideração tiverem sentidos opostos com relação à direção de visão, o vértice é desenhado.

5.4 Comentários finais

Neste capítulo, os métodos envolvidos na técnica adaptada do *perspective contouring* foram apresentados. O processo para determinar as propriedades das linhas de desenho começa desde a determinação, pelo usuário, das ROIs, e termina com os ajustes finos possibilitados pelas curvas de função. Resultados desta técnica são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resultados

Para avaliar a técnica desenvolvida foram geradas ilustrações a partir de modelos geométricos obtidos do conjunto de dados anatômicos Anatomium™ 3D¹.

As figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram algumas ilustrações criadas com o sistema desenvolvido a partir de modelos de órgãos humanos. A Figura 6.1(a) mostra um modelo de estômago, na forma de uma malha composta por 4200 triângulos, exibida através do *pipeline* clássico da OpenGL. A iluminação, apesar de simples, permite observar a forma geral do modelo. A Figura 6.1(b) mostra uma ilustração gerada através do sistema aqui implementado, usando *perspective contouring*. Para ressaltar a curvatura de algumas partes, foram adicionadas três regiões de *highlight*. Pode-se observar também a modificação na espessura das linhas, principalmente da linha de contorno próxima à região do *highlight*. Um aspecto interessante da ilustração gerada é a região superior do estômago, onde a linha é mais grossa. Esse efeito é naturalmente obtido pelas projeções superpostas de diversas seções.

Já o modelo geométrico dos pulmões é uma malha com 6970 triângulos. A imagem gerada com OpenGL mostra os pulmões com *highlights* na região inferior dos dois pulmões em função da iluminação frontal, como se fosse uma *headlight*. A ilustração gerada com a técnica de *perspective contouring* reproduz com razoável similaridade a imagem. A maior amplitude da região do *highlight* no pulmão à esquerda, na ilustração, foi escolha do ilustrador, que esboçou uma ROI maior. Pode-se observar, entretanto, que a composição das seções na parte interna produz o mesmo efeito da pouca iluminação do interior na imagem por superfície.

A figura 6.3(a) mostra um modelo de um fígado humano em uma malha com 1618 triângulos. A figura 6.3(b) exhibe a ilustração obtida com uma única curva de eixo e ROI. O espaçamento menor das linhas de contorno gera um efeito de textura na superfície do órgão.

¹ <http://www.anatomium.com/>

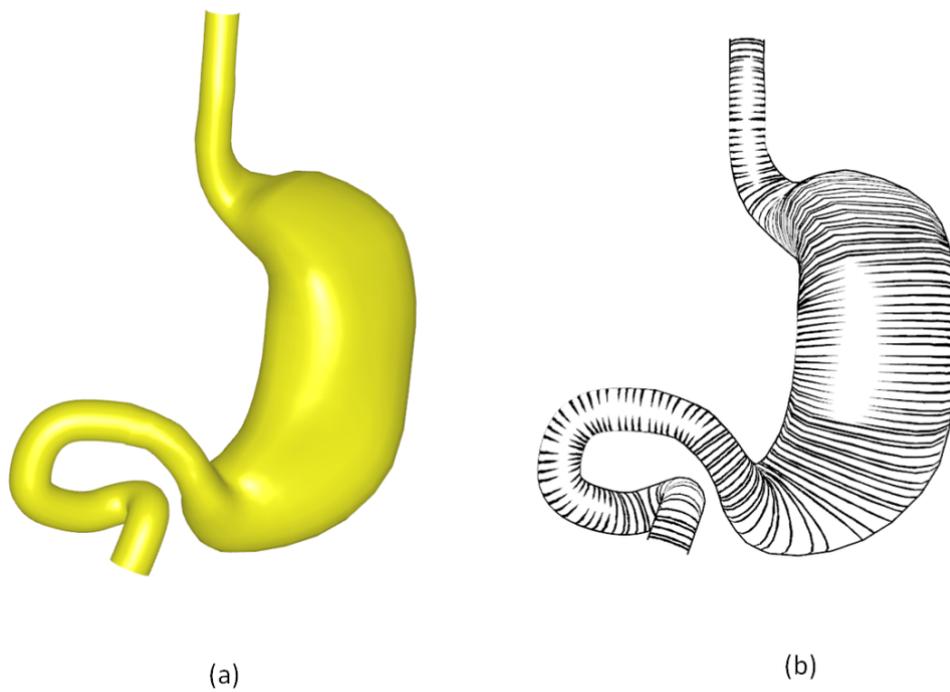


Figura 6.50: Resultado obtido com o sistema desenvolvido (b) a partir do modelo de um estômago humano (a).

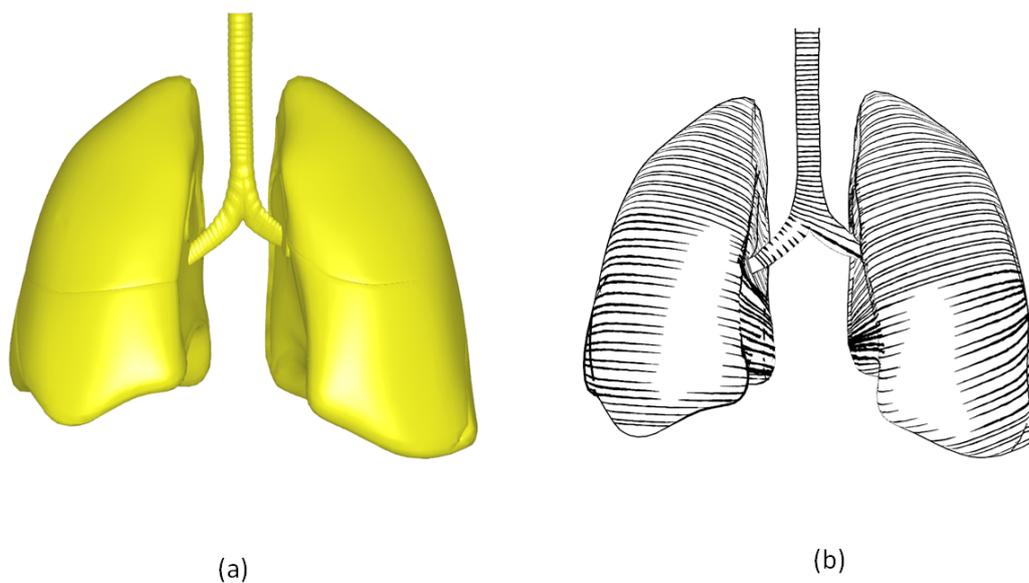


Figura 6.51: Resultado obtido com o sistema (b) a partir do modelo de um par de pulmões humanos (a).

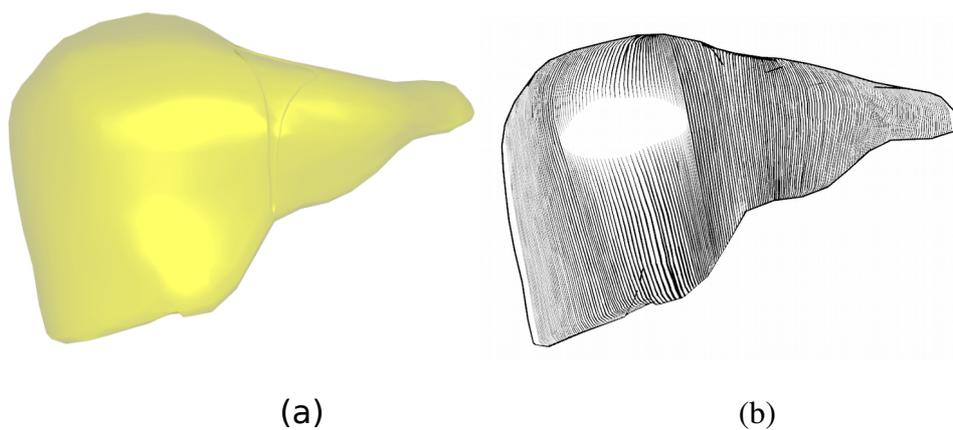


Figura 6.52: Resultado obtido com o sistema (b) a partir do modelo de um fígado humano (a).

Para obter variadas representações do modelo, o usuário pode utilizar diferentes curvas de esboço nos painéis que mapeiam as curvas de eixo. Alguns resultados obtidos com diferentes curvas de função são apresentados nas figuras 6.3 e 6.4.

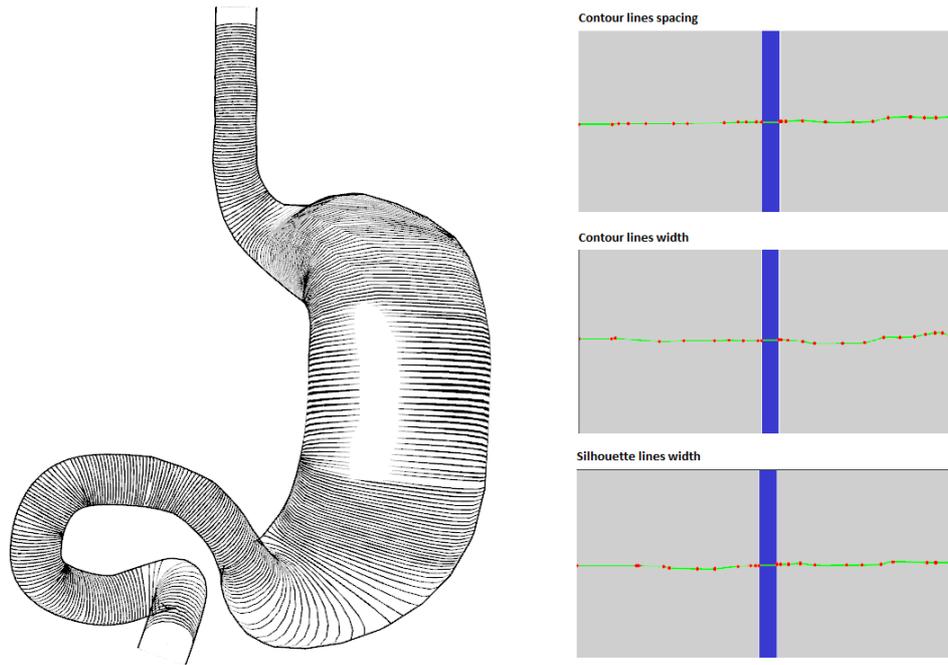


Figura 6.53: Resultado obtido com as curvas de função apresentadas nos painéis à direita.

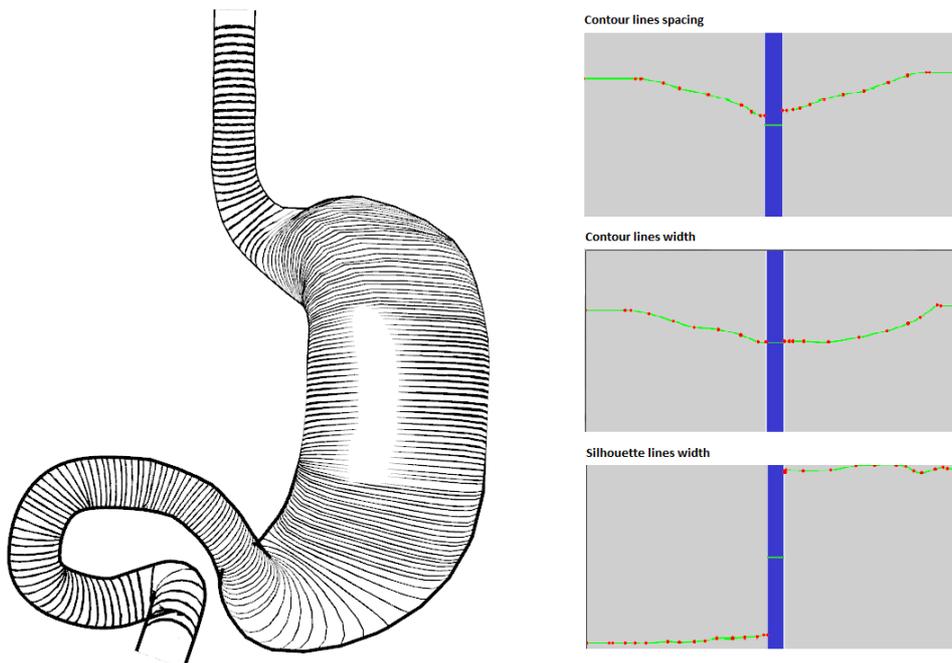


Figura 6.54: Resultado obtido com as curvas de função apresentadas nos painéis à direita.

6.2 Avaliação

As ilustrações geradas nas figuras 6.1 e 6.2 não foram obtidas por um ilustrador. Assim, para avaliar as possibilidades da técnica quando usada por um ilustrador

profissional foi conduzida uma entrevista, após uma sessão de treinamento com o sistema.

O profissional, Marcelo Hernandez Borba, voluntário para a entrevista, é artista visual com ênfase em desenho, formado pelo Instituto de Artes da UFRGS. Na área de design gráfico, sua produção como designer divide-se principalmente entre identidade visual (criação ou redesign de logotipos) e design para impressão (flyers, catálogos). O designer também desenvolve projetos distintos de design digital tais como ilustrações em desenho digital, manipulação fotográfica, infográficos multimídia, objetos de e-learning, animações, personagens e ambientes virtuais 3D e websites. Como produção artística, seu trabalho é focado na pesquisa do desenho, comparando o desenho tradicional (grafite) com o desenho digital (pen tablet). Entre os softwares que utiliza em seu trabalho estão: Photoshop®, Painter®, 3DS MAX®, CorelDraw® e After Effects.

Inicialmente, o designer criou ilustrações dos modelos apresentados nas figuras 6.1 e 6.2, através de métodos tradicionais de desenho: com papel e caneta e no PhotoShop®. As figuras 6.5 e 6.6 mostram a comparação das ilustrações criadas pelo sistema e as ilustrações criadas com papel e caneta e Photoshop®, respectivamente.

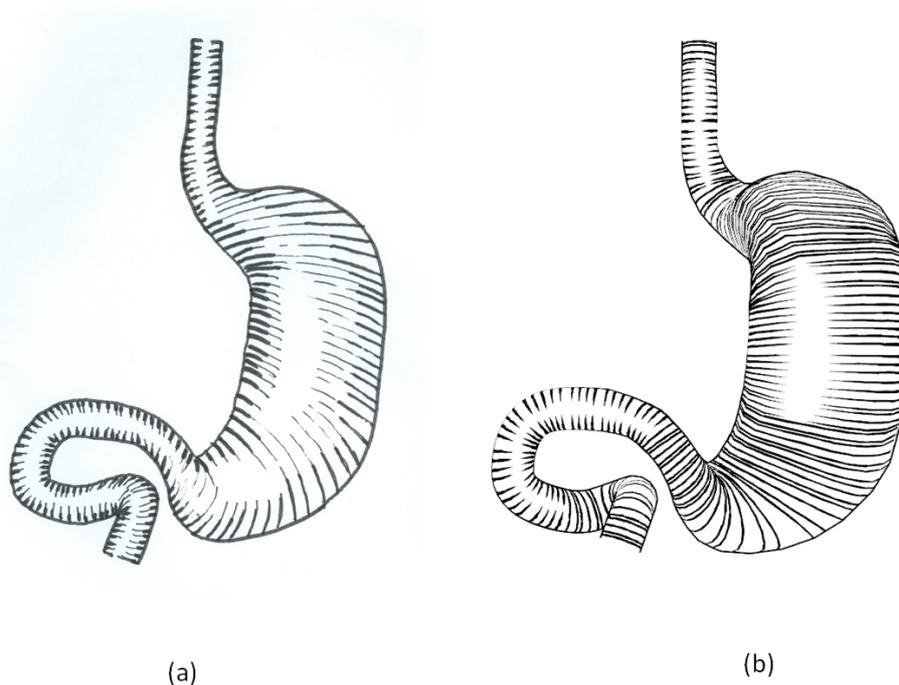


Figura 6.55: (a) Ilustração feita à caneta em papel do modelo do estômago humano, e (b) ilustração digital feita com o sistema desenvolvido.

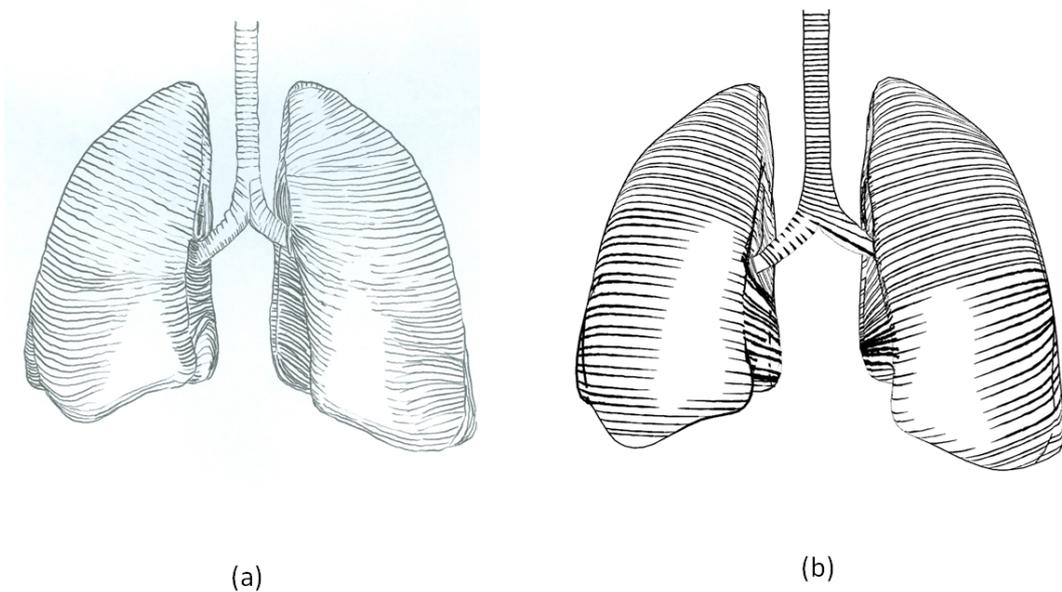


Figura 6.56: (a) Ilustração feita com a ferramenta Photoshop® do modelo de um par de pulmões humanos, e (b) ilustração digital feita com o sistema desenvolvido.

Como pode ser visto na comparação visual apresentada, é possível criar com o sistema desenvolvido, ilustrações semelhantes às criadas por um profissional com métodos tradicionais. Nessa avaliação preliminar do sistema, o designer achou bastante interessante a abordagem utilizada e aprovou os resultados obtidos. Ele ainda apontou como vantagens do sistema:

- A criação automática das linhas, em comparação com métodos manuais, o que poupa trabalho e tempo do ilustrador;
- Interface bastante intuitiva, dando ao ilustrador a liberdade de desenhar sobre o modelo para escolher a direção das linhas, assim como o *highlight*.
- A visualização tridimensional do desenho, permitindo ao ilustrador explorar outros pontos de vista.

O contato com o designer também foi bastante útil para se ter um retorno de pontos a serem melhorados no sistema. Um dos pontos discutidos é a utilização do desenho da malha do objeto em iluminação realística, apresentada ao usuário como referência para a escolha da direção das linhas de contorno e determinação das ROIs, como ponto de partida para o desenho da curva de *highlight*. Segundo o designer, o usuário poderia se beneficiar ao utilizar o *highlight* gerado sobre a superfície do objeto pela fonte de luz da cena como referência para o desenho da curva de *highlight* que

determina a ROI. Seria interessante dar ao usuário o controle da fonte de luz para que ele visualizasse o *highlight* sobre o modelo antes de escolher a ROI.

Outro ponto apontado pelo designer, que poderia permitir ao usuário facilidades não encontradas em métodos manuais de ilustração, é a definição da curva de eixo no espaço tridimensional, ao invés da definição no plano. Isso seria bastante útil, por exemplo, quando criando ilustrações de estruturas tubulares que não estão localizadas em um único plano. Uma edição mais fina das curvas de eixo, através, por exemplo, da manipulação dos pontos de controle depois de feito o esboço poderia ajudar o usuário a criar eixos em estruturas muito tortuosas ou muito finas, onde o esboço pode ser difícil de fazer com precisão.

6.3 Discussão

Em relação aos trabalhos revisados no capítulo 2, um dos pontos que destaca a abordagem utilizada daquelas usadas por outros autores é a utilização de seções da malha do objeto como base para a criação das linhas de contorno. As seções do modelo definidas analiticamente no espaço tridimensional permitem uma fácil manipulação dos atributos das linhas, e possibilitam ao usuário visualizar o desenho de qualquer ponto de vista mantendo consistência no desenho das linhas.

A técnica interativa aplicada possibilita ao usuário um controle maior sobre as linhas de desenho quando comparada com técnicas que geram as linhas automaticamente através de medições na superfície da malha do objeto. Permitir ao usuário determinar a orientação das linhas, assim como propriedades de espaçamento, comprimento e espessura, torna possível a criação de ilustrações mais expressivas já que o usuário pode manipular as linhas de acordo com sua vontade e atingir efeitos que não são possíveis de reproduzir com as técnicas existentes na literatura.

A criação de ênfase em ilustrações com linhas de contorno não é possível nos trabalhos revisados, e a técnica adaptada aqui consegue contribuir para que ilustrações mais eficiente possam ser produzidas de forma simples e intuitiva.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma nova abordagem para a criação de ilustrações digitais com linhas de contorno e silhueta através do uso de princípios perceptuais para permitir ao usuário enfatizar regiões de interesse e criar focos de atenção na imagem.

Para facilitar a criação da ilustração, o sistema desenvolvido emprega uma interface baseada em esboço para realizar as principais tarefas envolvidas no processo de criação da ilustração como definir a orientação das linhas de contorno, regiões de interesse, *highlights* e variação dos atributos das linhas de desenho. Ao utilizar uma forma de interação com a qual o ilustrador tradicional está acostumado, o sistema se torna bastante intuitivo.

As imagens apresentadas no capítulo 6 demonstram como ilustrações com foco de atenção podem ser geradas através da manipulação dos atributos das linhas como espessura, espaçamento e comprimento. A técnica do *perspective contouring* consegue criar a ilusão de que uma determinada região salta aos olhos do observador. Os conceitos envolvidos na técnica aplicada são amplamente utilizados por ilustradores tradicionais e mostramos que eles podem ser adaptados para a visualização digital de dados. O trabalho realizado é um passo nessa direção, de que o conhecimento artístico, já bastante consolidado por vários séculos, possa cada vez mais beneficiar a pesquisa em visualização. Os resultados preliminares deste trabalho estão sendo publicados em (MEDEIROS, 2009).

A avaliação realizada com um designer profissional demonstrou que o sistema consegue gerar ilustrações semelhantes às que um ilustrador geraria com métodos manuais. A avaliação ressaltou as vantagens do sistema para a criação de ilustrações em comparação com métodos mais tradicionais de desenho, como a fácil definição da orientação das linhas de contorno ao longo do objeto e das ROIs; a criação automática das linhas de contorno e de silhueta, que poupa o ilustrador do trabalho de desenhar cada linha individualmente; a possibilidade de visualizar o desenho de qualquer direção, e poder girá-lo durante a fase de criação. A avaliação também gerou discussões de como o sistema poderia ser melhorado.

7.1 Trabalhos futuros

7.1.1 Extração automática do esqueleto

Para facilitar a modelagem do eixo utilizado na extração das seções do modelo, um esqueleto extraído automaticamente da malha será apresentado ao usuário. Esse esqueleto é representado por uma ou mais curvas paramétricas conectadas e serve de referência ao usuário que pode realizar ajustes através de esboços. O esqueleto automático pode acelerar o passo inicial de modelagem do eixo das seções, mas deve ser usado em conjunto com as curvas definidas por esboço para atender às necessidades específicas de cada usuário.

7.1.2 Ajuste interativo das curvas de esboço

O atual sistema permite o desenho de curvas através de um dispositivo de entrada. As curvas são capturadas e parametrizadas, e para modificá-las, o usuário precisa redesenhá-las completamente, o que pode não ser desejável com curvas muito grandes ou quando se quer ajustar apenas um pequeno trecho. Para tornar a edição mais eficiente, o usuário poderá editar uma curva selecionando um ponto sobre ela e esboçando o novo trecho de curva, que pode até reencontrar a curva original em algum outro ponto. Essa técnica é chamada de *oversketching*, onde o usuário modifica um trecho da curva esboçando uma nova entre os dois pontos desejados. Para permitir um ajuste mais fino das curvas será possível também editar manualmente os pontos de controle diretamente no desenho das curvas.

Essa técnica será usada em todas as curvas de esboço do sistema, nos *highlights* das ROIs, nas curvas de controle de atributos, e nas curvas de esqueleto. Os esqueletos automaticamente extraídos (seção 7.1.1) também poderão ser editados desta forma, já que serão representados por curvas paramétricas.

7.1.3 Aplicação de estilos

Os ilustradores utilizam diversos estilos de linha de desenho em suas ilustrações, que dependem de fatores como: efeitos de sombreamento e iluminação que o artista quer criar, representação de diferentes materiais da cena, emoção que se deseja despertar no observador e até o próprio estilo pessoal do artista.

Para poder permitir a criação mais abrangente de ilustrações com linhas, é preciso dar ao usuário a possibilidade de aplicar diferentes estilos de linhas. Ainda é preciso estudar como tornar a operação de atribuir diferentes estilos para diferentes conjuntos de linha em um processo intuitivo e fácil de ser realizado. Uma possibilidade é selecionar um conjunto de linhas a ser estilizado utilizando uma curva de esboço como na seleção da ROI. Para acelerar o processo, o usuário poderia atribuir a cada curva de eixo um tipo de linha específico.

7.1.4 Composição de cenas complexas

O sistema desenvolvido permite a ilustração de apenas um modelo de cada vez. Para criar ilustrações mais complexas, que demonstrem o relacionamento entre diferentes estruturas e permita o uso de informação de contexto para esclarecer a interpretação de uma visualização, é preciso poder manipular mais de um modelo na mesma cena. Essa não é uma tarefa tão simples, pois a construção da ilustração de um modelo precisa levar em conta o que está ao seu redor, e características como tom de sombreamento, estilo de linha e foco de atenção precisam ser balanceadas para que o usuário consiga transmitir sua intenção. A tarefa mais árdua novamente é como permitir o uso dessas funcionalidades de maneira intuitiva e descomplicada para o usuário.

Um ponto relacionado é o uso de rótulos para enriquecer a ilustração. Os rótulos também devem permitir o uso de diferentes estilos de fonte para que se adequem ao estilo da ilustração. A otimização do posicionamento dos rótulos em volta da estrutura ilustrada é algo que fica mais complicado em cenas complexas com mais de uma estrutura em cena, pois é preciso considerar a ilustração como um todo e manter a consistência quando o usuário manipula a ilustração através de rotações.

7.1.5 Utilização da fonte de luz para a definição do *highlight*

Um dos pontos mencionados pelo designer ao avaliar o sistema, é a possibilidade de utilizar o retorno visual do *highlight* gerado pela fonte de luz no desenho da malha do objeto como referência da determinação da curva de *highlight* utilizada na criação da ilustração com linhas.

Para que isso seja possível é preciso dar ao usuário o controle da fonte de luz para que ele possa visualizar o *highlight* em diferentes partes do objeto e escolher a que seria melhor para a ilustração a ser criada. Indo um passo além, após a criação das linhas de contorno, o usuário poderia ainda manipular a fonte de luz em volta do objeto, e a região de *highlight* (ausência das curvas) seguiria a manipulação de maneira coerente, facilitando a edição da posição do *highlight* sem que o usuário tenha que redesenhar a curva em outro lugar.

REFERÊNCIAS

ANTTWEAKBAR. Disponível em: <http://www.antisphere.com/Wiki/tools:anttweakbar>. Acesso em: 15 abr. 2008.

APPEL, A.; ROHLF, F. J.; STEIN, A. J. The haloed line effect for hidden line elimination. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 6., 1979, SIGGRAPH '79, Chicago, USA. **Proceedings...**New York, USA: ACM, 1979, p. 151-157.

BARTELS, R. H.; SAMAVATI, F. F. Reversing subdivision rules: local linear conditions and observations on inner products. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 119, n. 1-2, p. 29-67, 2000.

BRUCKNER, S. *et al.* Illustrative context preserving volume rendering. In: EUROGRAPHICS/IEEE-VGTC SYMPOSIUM ON VISUALIZATION, 7., 2005, EUROVIS05, Leeds, GBR. **Proceedings...** [S.l.]: Eurographics Association, 2005, p. 69-76.

BRUCKNER, S.; GRÖLLER M. E. Exploded views for volume data. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 12, n. 5, p. 1077-1084, 2006.

CHAIKIN, G. An algorithm for high speed curve generation. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 3, p. 346-349, 1974.

CHERLIN, J. J. *et al.* Sketch-based modeling with few strokes. In: SPRING CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS, 21., 2005, SCCG '05, Budmerice, SVK. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 2005, p. 137-145.

COCKSHOTT, T. **Wet and sticky: a novel model for computer-based painting**. PhD thesis, University of Glasgow, 1991.

CORNEA, N. D.; MIN, P. Curve-skeleton properties, applications, and algorithms. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 13, n. 3, p. 530-548, 2007.

CORREA, C. D.; SILVER, D.; CHEN, M. Feature aligned volume manipulation for illustration and visualization. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 12, n. 5, p. 1069-1076, 2006.

DEUSSEN, O. *et al.* An illustration technique using intersections and skeletons. In: GRAPHICS INTERFACE, 18., 1999, GI1999, Kingston, CAN. **Proceedings...** San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 1999, p. 175-182.

DOOLEY, D.; COHEN, M. Automatic illustration of 3D geometric models: lines. In: Symposium on Interactive 3D Graphics, 2., 1990, SI3D '90, Snowbird, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 1990, p. 77-82.

ELBER, G. Line art illustrations of parametric and implicit forms. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 4, n. 1, p. 71-81, 1998.

ELBER, G. Interactive line art rendering of freeform surfaces. **Computer Graphics Forum**, v. 18, n. 3, p. 1-12, 1999.

GIRSHICK, A. *et al.* Line direction matters: an argument for the use of principal directions in 3d line drawings. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NON-PHOTOREALISTIC ANIMATION AND RENDERING, 1., 2000, NPAR '00, Annecy, FRA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 2000, p. 43-52.

GOLDSTEIN, N. *The art of Responsive Drawing.* Prentice-Hall. 1999.

GUO, Q.; KUNII, T. Modeling the diffuse painting of sumie. **IFIP Modeling in Computer Graphics**, 1991.

HAEBERLI, P. Paint by numbers: abstract image representations. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 17., 1990, SIGGRAPH '90, Dallas, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 1990, p. 207-214.

HAGGERTY, M. Almost automatic computer painting. **IEEE Computer Graphics & Applications**, v. 11, n. 6, p. 11-12, 1991.

HERTZMANN, A; ZORIN, D; Illustrating smooth surfaces. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 27., 2000, SIGGRAPH '00, New Orleans, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM / Addison Wesley Longman, 2000, p. 517-526.

INTERRANTE, V. L. Illustrating surface shape in volume data via principal direction-driven 3D line integral convolution. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 24., 1997, SIGGRAPH '97, Los Angeles, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM / Addison Wesley Longman, 1997, p. 109-116.

KAMADA, T.; KAWAI, S. An enhanced treatment of hidden lines. **ACM Transactions on Graphics**, v. 6, n. 4, p. 309-323, 1987.

KOFFKA, K. **Principles of Gestalt psychology.** Harcourt-Brace, New York, 1935.

LEE, J. Physically-based modeling of brush painting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL GRAPHICS AND VISUALIZATION TECHNIQUES ON VISUALIZATION AND GRAPHICS ON THE WORLD WIDE

WEB, 5., 1997, COMPUGRAPHICS '97, Bonneuil-sur-Marne, FRA. *Proceedings...* New York, USA: Elsevier Science, 1997, p. 1571-1576.

MCGUIRE, M.; HUGHES, J. F. Hardware-determined feature edges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NON-PHOTOREALISTIC ANIMATION AND RENDERING, 3., 2004, NPAR '04, Annecy, FRA. *Proceedings...* New York, USA: ACM, 2004, p. 35-47.

MEDEIROS, J. *et al.* Perspective contouring in illustrative visualization. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 22., 2009, SIBGRAPI '09, Rio de Janeiro, BRA. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2009.

MEIER, B. J. Painterly rendering for animation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 23., 1996, SIGGRAPH '96, New Orleans, USA. *Proceedings...* New York, USA: ACM, 1996, p. 477-484.

OBJECT. Disponível em: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/obj/>. Acesso em: 15 mar. 2008.

RHEINGANS, P.; EBERT, D. Volume illustration: nonphotorealistic rendering of volume models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 7, n. 3, p. 253-264, 2001.

RITTER, F. *et al.* Real-time illustration of vascular structures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 12, n. 5, p. 877-884, 2006.

ROSSL, C.; KOBELT, L.; SEIDEL, H. -P. Line art rendering of triangulated surfaces using discrete lines of curvature. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN CENTRAL EUROPE ON COMPUTER GRAPHICS, VISUALIZATION AND INTERACTIVE DIGITAL MEDIA, 8., 2000, WSCG '00, Plzen, CZE. *Proceedings...* [S.l.]:[s.n.], 2000, p. 168-175.

RÖSSL, C.; KOBELT, L. Line-art rendering of 3D-models. In: PACIFIC CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS, 8., 2000, PG '00, Hong Kong, CHN. *Proceedings...* Washington, USA: IEEE Computer Society, 2000, p. 87.

SAITO, T.; TAKAHASHI, T. Comprehensible rendering of 3-D shapes. *SIGGRAPH Comput. Graph.* V. 24, n. 4, p. 197-206, 1990.

SALISBURY, M. P. *et al.* Interactive pen-and-ink illustration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 21., 1994, SIGGRAPH '94, Orlando, USA. *Proceedings...* New York, USA: ACM, 1994, p. 101-108.

SOUSA, M. C.; GOOCH, A. A.; GOOCH, B. Illustrative scientific visualization framework. In: EUROGRAPHICS WORKSHOP ON COMPUTATIONAL AESTHETICS IN GRAPHICS, VISUALIZATION AND IMAGING, 1., 2005, CAe

'05, Girona, ESP. **Proceedings...** Aire-la-Ville, CHA: Eurographics Association, 2005, p. 57-65.

SOUSA, M. C.; PRUSINKIEWICZ, P. A few good lines: suggestive drawing of 3d models. **Computer Graphics Forum (Eurographics 2003)**, v. 22, n. 3, p. 81-390, 2003.

STRASSMANN, S. Hairy brushes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 13., 1986, SIGGRAPH '86, Dallas, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 1986, p. 225-232.

STROTHOTTE, T.; SCHLECHTWEG, S. **Non-photorealistic computer graphics: modeling, rendering, and animation**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002.

VIOLA, I.; KANITSAR, A.; GRÖLLER, M. E. Importance-driven feature enhancement in volume visualization. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 11, n. 4, p. 408-418, 2005.

VIOLA, I. *et al.* Illustrative visualization. **IEEE Visualization Tutorial on Illustrative Visualization**, [S.l.], 2005.

VIOLA, I. *et al.* Illustrative Visualization for Medicine and Science. **Eurographics 2006 Tutorial**, 2006.

WARE, C. **Information visualization: perception for design**. Morgan Publishers Inc, 2000.

WINKENBACH, G.; SALESIN, D. H. Computer-generated pen-and-ink illustration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 21., 1994, SIGGRAPH '94, Orlando, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 1994, p. 91-100.

WINKENBACH, G.; SALESIN, D. H. Rendering parametric surfaces in pen and ink. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 23., 1996, SIGGRAPH '96, New Orleans, USA. **Proceedings...** New York, USA: ACM, 1996, p. 469-476.

WOOLRIDGE, N.; JENKINSON, J. Visually-oriented knowledge media design in medicine. **KMDI, Biomedical Communications**, University of Toronto, 2004.