

João Madeiras Pereira / João Brisson
António Coelho / Alfredo Ferreira / Mário Rui Gomes



Introdução à **Computação Gráfica**



EDIÇÃO

FCA – Editora de Informática, Lda.
Av. Praia da Vitória, 14 A – 1000-247 Lisboa
Tel: +351 213 511 448
fca@fca.pt
www.fca.pt

DISTRIBUIÇÃO

Lidel – Edições Técnicas, Lda.
Rua D. Estefânia, 183, R/C Dto. – 1049-057 Lisboa
Tel: +351 213 511 448
lidel@lidel.pt
www.lidel.pt

LIVRARIA

Av. Praia da Vitória, 14 A – 1000-247 Lisboa
Tel: +351 213 511 448 * Fax: +351 213 522 684
livraria@lidel.pt

Copyright © 2018, FCA – Editora de Informática, Lda.
ISBN edição impressa: 978-972-722-877-5
1.ª edição impressa: maio 2018

Paginação: Carlos Mendes
Impressão e acabamento: Tipografia Lousanense, Lda. – Lousã
Depósito Legal n.º 441213/18
Capa: José Manuel Reis
Ilustração da capa: Miguel Montenegro

Marcas Registradas de FCA – Editora de Informática, Lda. –



Depressa & Bem®

Todos os nossos livros passam por um rigoroso controlo de qualidade, no entanto aconselhamos a consulta periódica do nosso [site \(www.fca.pt\)](http://www.fca.pt) para fazer o *download* de eventuais correções.

Não nos responsabilizamos por desatualizações das hiperligações presentes nesta obra, que foram verificadas à data de publicação da mesma.

Os nomes comerciais referenciados neste livro têm patente registada



Reservados todos os direitos. Esta publicação não pode ser reproduzida, nem transmitida, no todo ou em parte, por qualquer processo eletrónico, mecânico, fotocópia, digitalização, gravação, sistema de armazenamento e disponibilização de informação, sítio *Web*, blogue ou outros, sem prévia autorização escrita da Editora, exceto o permitido pelo CDADC, em termos de cópia privada pela AGECOP – Associação para a Gestão da Cópia Privada, através do pagamento das respetivas taxas.

ÍNDICE GERAL

SOBRE OS AUTORES	XIII
AGRADECIMENTOS	XV
EXTRATEXTO A CORES	XVII
PREFÁCIO	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A QUEM SE DESTINA O LIVRO	2
1.2 ESTRUTURA DO LIVRO	2
1.3 NOTAÇÃO ADOTADA	3
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS (João Madeiras Pereira e João Brisson)	5
SUMÁRIO	5
OBJETIVOS	5
2.1 DISPOSITIVOS GRÁFICOS	5
2.1.1 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO	6
2.1.2 DISPOSITIVOS GRÁFICOS DE ENTRADA	7
2.1.2.1 VETORIAIS	7
2.1.2.2 RASTER	8
2.1.3 DISPOSITIVOS GRÁFICOS DE SAÍDA	8
2.2 ARQUITETURA GRÁFICA RASTER	8
2.2.1 PROCESSADOR GRÁFICO	9
2.2.2 MEMÓRIA DE IMAGEM OU FRAMEBUFFER	10
2.2.3 CONTROLADOR DE VÍDEO	12
2.3 APLICAÇÕES GRÁFICAS 3D	12
2.4 DESCRIÇÃO DE CENAS	13
2.5 SÍNTESE DE IMAGEM	14
2.5.1 PERCEÇÃO TRIDIMENSIONAL	14
2.5.2 CONCEITO DE JANELAS E AFINS	15
2.5.3 ESTRATÉGIAS DE SÍNTESE DE IMAGENS	15
2.6 PIPELINE DE VISUALIZAÇÃO	16
2.6.1 ARQUITETURA GERAL	16
2.7 DISPOSITIVOS, LUZ E COR	19
2.7.1 MODELO RGB	20

2.7.2	MODELO CMY	22
2.7.3	MODELOS HSV E HSL	23
2.7.4	ESPAÇO $Y_C C_b C_r$ E MODELO $Y_C' C_b' C_r'$ (YUV).....	25
2.7.5	ESPAÇO E DIAGRAMA CIE.....	25
	RESUMO	27
	BIBLIOGRAFIA	28
	EXERCÍCIOS.....	28
3	TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS (António Coelho e Alfredo Ferreira)	29
	SUMÁRIO	29
	OBJETIVOS	29
3.1	PONTOS E SISTEMA DE COORDENADAS	29
3.2	TRANSFORMAÇÕES PLANAS ELEMENTARES.....	31
3.2.1	TRANSLAÇÃO.....	32
3.2.2	VARIAÇÃO DE ESCALA.....	32
3.2.3	ROTAÇÃO EM TORNO DA ORIGEM.....	34
3.3	COORDENADAS HOMOGÉNEAS.....	34
3.3.1	TRANSLAÇÃO.....	35
3.3.2	VARIAÇÃO DE ESCALA.....	36
3.3.3	ROTAÇÃO.....	36
3.4	TRANSFORMAÇÕES EM 3D	37
3.4.1	TRANSLAÇÃO E VARIAÇÃO DE ESCALA	37
3.4.2	ROTAÇÃO.....	37
3.5	COMPOSIÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES	38
3.5.1	ROTAÇÃO SOBRE UM PONTO ARBITRÁRIO	39
3.5.2	ESCALAMENTO DE UM OBJETO NÃO CENTRADO NA ORIGEM.....	40
3.6	MODELAÇÃO HIERÁRQUICA.....	40
3.6.1	GRAFO DE CENA.....	43
	RESUMO	44
	BIBLIOGRAFIA	45
	EXERCÍCIOS.....	45
4	MODELAÇÃO (João Brisson e António Coelho)	47
	SUMÁRIO	47
	OBJETIVOS	47
4.1	MODELAÇÃO GEOMÉTRICA	47
4.1.1	PROPRIEDADES DESEJÁVEIS PARA AS REPRESENTAÇÕES.....	49
4.1.2	INSTANCIAMENTO DE PRIMITIVAS.....	50
4.1.3	CSG.....	51
4.1.3.1	OPERAÇÕES BOOLEANAS	51

4.1.4	<i>B-REPS</i> (REPRESENTAÇÃO DE FRONTEIRA).....	52
4.1.4.1	REPRESENTAÇÃO POR POLIEDROS	52
4.1.5	REPRESENTAÇÃO POR VARRIMENTO.....	53
4.1.6	PARTIÇÃO DO ESPAÇO	54
4.1.6.1	ENUMERAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DO ESPAÇO	54
4.1.6.2	REPRESENTAÇÃO POR ÁRVORE DE OCTANTES.....	55
4.1.6.3	REPRESENTAÇÃO POR ÁRVORE DE PARTIÇÃO BINÁRIA.....	56
4.1.7	MODELOS DE MALHA POLIGONAL.....	57
4.1.7.1	OPERAÇÕES SOBRE MODELOS DE MALHA POLIGONAL.....	58
4.1.7.2	MALHA POLIGONAL DE LISTA EXPLÍCITA	59
4.1.7.3	MALHA POLIGONAL DE LISTA DE VÉRTICES	59
4.1.7.4	MALHA POLIGONAL DE LISTA DE LADOS	60
4.1.7.5	VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DE MALHAS POLIGONAIS	61
4.2	CURVAS E SUPERFÍCIES.....	62
4.2.1	CURVAS CÚBICAS.....	62
4.2.1.1	CONTINUIDADE ENTRE SEGMENTOS DE CURVA	63
4.2.1.2	TIPOS DE CURVAS PARAMÉTRICAS.....	64
4.2.1.3	CURVAS DE HERMITE.....	65
4.2.1.4	CURVAS DE BÉZIER	67
4.2.1.5	DESENHO DE CURVAS CÚBICAS PARAMÉTRICAS.....	69
4.2.2	CURVAS <i>SPLINE</i>	70
4.2.3	SUPERFÍCIES BICÚBICAS PARAMÉTRICAS	71
	RESUMO	72
	BIBLIOGRAFIA.....	72
	EXERCÍCIOS.....	72
5	PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO (João Madeiras Pereira).....	75
	SUMÁRIO	75
	OBJETIVOS.....	75
5.1	OPERAÇÕES DE PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO.....	75
5.2	MODELO DE CÂMARA VIRTUAL SIMPLES.....	76
5.2.1	REFERENCIAL DA CÂMARA	77
5.2.2	VOLUMES DE VISUALIZAÇÃO	79
5.2.3	INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO EM OPENGL.....	83
5.3	TRANSFORMAÇÕES E ESPAÇOS COORDENADOS	83
5.4	TRANSFORMAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO.....	84
5.5	TRANSFORMAÇÃO DE PROJEÇÃO.....	85
5.5.1	VOLUME CANÔNICO ORTOGONAL.....	86
5.5.2	PROJEÇÃO ORTOGONAL	87
5.5.3	PROJEÇÃO EM PERSPECTIVA.....	88

5.5.3.1	PROJEÇÃO EM PERSPETIVA SIMPLES.....	89
5.5.3.2	TRANSFORMAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERSPETIVA.....	90
5.5.3.3	MATRIZ DE PROJEÇÃO EM PERSPETIVA.....	92
5.5.3.4	RECORTE E DIVISÃO PERSPETIVA.....	92
5.6	TRANSFORMAÇÃO DE <i>VIEWPORT</i>	93
	RESUMO.....	94
	BIBLIOGRAFIA.....	95
	EXERCÍCIOS.....	95
6	RECORTE (João Brisson e Mário Rui Gomes)	97
	SUMÁRIO.....	97
	OBJETIVOS.....	97
6.1	RECORTE DE SEGMENTOS DE RETA.....	98
6.1.1	ALGORITMO DE FORÇA BRUTA.....	99
6.1.2	ALGORITMO DE COHEN-SUTHERLAND.....	99
6.1.3	ALGORITMO PARAMÉTRICO DE CYRUS-BECK.....	103
6.1.4	ALGORITMO DE LIANG E BARSKY.....	106
6.2	RECORTE DE POLÍGONOS.....	108
6.2.1	ALGORITMO DE SUTHERLAND-HODGMAN.....	109
	RESUMO.....	112
	BIBLIOGRAFIA.....	113
	EXERCÍCIOS.....	113
7	ILUMINAÇÃO E SOMBREAMENTO (João Madeiras Pereira, João Brisson e Mário Rui Gomes)	115
	SUMÁRIO.....	115
	OBJETIVOS.....	115
7.1	FONTES DE LUZ.....	116
7.2	MODELO DE ILUMINAÇÃO LOCAL DE BLINN-PHONG.....	117
7.2.1	LUZ AMBIENTE.....	118
7.2.2	REFLEXÃO DIFUSA.....	118
7.2.3	REFLEXÃO ESPECULAR.....	119
7.2.4	EXPRESSÃO GLOBAL.....	121
7.2.5	APROXIMAÇÃO DE BLINN.....	122
7.2.6	ATENUAÇÃO DA INTENSIDADE COM A DISTÂNCIA.....	123
7.2.7	FONTES DE LUZ E MATERIAIS CROMÁTICOS.....	123
7.2.8	MÚLTIPLAS FONTES DE LUZ.....	124
7.3	SOMBREAMENTO.....	124
7.3.1	SOMBREAMENTO CONSTANTE.....	125
7.3.2	SOMBREAMENTO DE GOURAUD.....	127
7.3.3	SOMBREAMENTO DE PHONG.....	128

7.3.4	LIMITAÇÕES DO SOMBREAMENTO.....	131
	RESUMO.....	133
	BIBLIOGRAFIA.....	133
	EXERCÍCIOS.....	133
8	DISCRETIZAÇÃO (João Madeiras Pereira e João Brisson)	135
	SUMÁRIO.....	135
	OBJETIVOS.....	135
8.1	OPERAÇÕES DE DISCRETIZAÇÃO.....	135
8.2	RASTERIZAÇÃO.....	136
8.2.1	RASTERIZAÇÃO DE SEGMENTOS DE RETA.....	137
8.2.1.1	ALGORITMO IMEDIATO.....	138
8.2.1.2	ALGORITMO INCREMENTAL BÁSICO.....	139
8.2.1.3	ALGORITMO DE BRESENHAM.....	139
8.2.2	RASTERIZAÇÃO DE POLÍGONOS.....	142
8.2.2.1	ALGORITMO BÁSICO DE RASTERIZAÇÃO DE POLÍGONOS.....	143
8.2.2.1.1	DUPLICAÇÃO DE INTERSECÇÕES.....	144
8.2.2.1.2	LADOS HORIZONTAIS.....	145
8.2.2.2	DETERMINAÇÃO DE INTERSECÇÕES.....	145
8.2.2.3	LADOS, LADOS ATIVOS E TABELAS DE LADOS.....	146
8.3	CÁLCULO DE COR NOS FRAGMENTOS.....	149
8.3.1	SOMBREAMENTO CONSTANTE.....	150
8.3.2	SOMBREAMENTO DE GOURAUD.....	150
8.3.3	SOMBREAMENTO DE PHONG.....	150
8.3.4	TEXTURIZAÇÃO.....	150
8.3.4.1	ESPAÇO DAS COORDENADAS DE TEXTURA.....	151
8.3.4.2	SOMBREAMENTO.....	153
8.3.4.3	<i>BUMP MAPPING</i>	154
8.3.4.4	<i>ENVIRONMENT MAPPING</i>	154
8.4	COMPOSIÇÃO.....	155
8.4.1	REMOÇÃO DOS ELEMENTOS OCULTOS.....	155
8.4.1.1	ESTRATÉGIAS ALGORÍTMICAS.....	155
8.4.1.2	ALGORITMO <i>Z-BUFFER</i>	156
8.4.2	FUNÇÃO DE MISTURA (<i>BLENDING</i>).....	157
8.5	<i>ALIASING</i> E <i>ANTIALIASING</i>	159
8.5.1	<i>ALIASING</i> EM COMPUTAÇÃO GRÁFICA.....	159
8.5.2	<i>ANTIALIASING</i>	160
8.5.2.1	PRÉ-FILTRAGEM.....	160
8.5.2.2	PÓS-FILTRAGEM.....	161
8.5.2.3	COMBINAÇÃO DE PRÉ E DE PÓS-FILTRAGEM.....	162

RESUMO.....	162
BIBLIOGRAFIA.....	163
EXERCÍCIOS.....	163
9 FOTORREALISMO (João Brisson)	165
SUMÁRIO.....	165
OBJETIVOS.....	165
9.1 RAY TRACING.....	165
9.1.1 O ALGORITMO FUNDAMENTAL DE RAY TRACING.....	166
9.1.2 CÁLCULO DE INTERSECÇÕES.....	168
9.1.3 INTERAÇÃO DA LUZ COM AS SUPERFÍCIES.....	169
9.1.3.1 TRANSMISSÃO ESPECULAR PERFEITA E REFRAÇÃO.....	169
9.1.3.2 REFLEXÃO TOTAL NA INTERFACE ENTRE DOIS MEIOS.....	171
9.1.3.3 LUZ TRANSMITIDA ATRAVÉS DE OBJETOS E MODELO DE ILUMINAÇÃO DE PHONG.....	172
9.1.3.4 ILUMINAÇÃO DIRETA E DETERMINAÇÃO DE SOMBRAS.....	173
9.1.4 O ALGORITMO COMPLETO.....	173
9.1.5 OTIMIZAÇÃO.....	176
9.1.5.1 TRANSFORMAÇÃO DA CENA SEGUNDO O RAIOS.....	176
9.1.5.2 INTERSECÇÃO COM VOLUMES ENVOLVENTES.....	177
9.1.5.3 HIERARQUIA DE VOLUMES ENVOLVENTES.....	177
9.1.5.4 PARTIÇÃO DO ESPAÇO.....	178
9.2 RADIOSIDADE.....	179
9.2.1 EQUAÇÃO DA RADIOSIDADE.....	180
9.2.1.1 IRRADIAÇÃO TOTAL.....	180
9.2.1.2 RADIOSIDADE TOTAL E RADIOSIDADE.....	181
9.2.1.3 FATORES DE FORMA.....	182
9.2.1.4 PROPRIEDADES DOS FATORES DE FORMA.....	182
9.2.1.5 EQUAÇÃO DA RADIOSIDADE.....	183
9.2.1.6 SOLUÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DE EQUAÇÕES.....	183
9.2.2 MÉTODO DO HEMICUBO.....	184
9.2.2.1 ANALOGIA DE NUSSOLT.....	184
9.2.2.2 O MÉTODO DO HEMICUBO.....	185
9.2.3 OTIMIZAÇÃO.....	186
9.2.3.1 SUBDIVISÃO ADAPTATIVA.....	186
9.2.3.2 RADIOSIDADE PROGRESSIVA.....	187
9.2.3.2.1 COLEÇÃO (GATHERING).....	187
9.2.3.2.2 DISPERSÃO (SHOOTING).....	188
9.2.3.2.3 SOLUÇÃO ORDENADA.....	188
9.2.3.2.4 TERMO AMBIENTE.....	189

9.2.3.2.5 COMPARAÇÃO ENTRE VÁRIAS ESTRATÉGIAS	192
RESUMO	192
BIBLIOGRAFIA	192
EXERCÍCIOS	193
A ELEMENTOS MATEMÁTICOS E GEOMÉTRICOS (João Brisson)	195
A.1 VETORES E OPERAÇÕES SOBRE VETORES	195
A.1.1 VETORES	195
A.1.2 PRODUTO INTERNO	196
A.1.3 PRODUTO EXTERNO	196
A.2. MATRIZES	197
A.3 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS SIMPLES	198
A.3.1 RETA, SEGMENTO DE RETA E SEMIRRETA	198
A.3.2 DISTÂNCIA ENTRE DOIS PONTOS	198
A.3.3 DISTÂNCIA DE UM PONTO A UMA RETA	198
A.3.4 PLANO E NORMAL AO PLANO	199
A.4 INTERSECÇÕES	200
A.4.1 INTERSECÇÃO DE DUAS ESFERAS	200
A.4.2 INTERSECÇÃO DE UMA SEMIRRETA COM UM PLANO	202
A.4.3 INTERSECÇÃO DE UMA SEMIRRETA COM UM POLÍGONO	203
A.4.4 INTERSECÇÃO DE UMA SEMIRRETA COM UM PARALELEPÍPEDO ORIENTADO SEGUNDO OS EIXOS	204
A.4.5 SENTIDOS E REFERENCIAIS	206
A.4.5.1 SENTIDOS	206
A.4.5.2 REFERENCIAIS DIREITOS E ESQUERDOS	206
BIBLIOGRAFIA	206
B FORMATOS DE IMAGEM (João Brisson)	207
B.1 CONCEITOS COMUNS	207
B.1.1 VARRIMENTO DE QUADRÍCULAS	207
B.1.2 MAPA DE CORES OU COR INDEXADA	207
B.1.3 ENTRELAÇAMENTO	208
B.1.4 <i>HIGH COLOR</i> E <i>TRUE COLOR</i>	210
B.1.5 COMPRESSÃO	210
B.2 DESCRIÇÃO DE ALGUNS FORMATOS DE IMAGEM	212
B.2.1 PBM	212
B.2.2 DIB/BMP	212
B.2.3 GIF	213
B.2.4 PNG	213
B.2.5 JFIF	214

B.2.6 TIFF.....	215
B.2.7 TGA.....	216
B.2.8 RAW	216
B.2.9 FORMATOS DE IMAGEM EM MEDICINA	217
B.3 COMPARAÇÃO DE FORMATOS DE IMAGEM	218
BIBLIOGRAFIA	222
GLOSSÁRIO DE TERMOS – PORTUGUÊS EUROPEU/PORTUGUÊS DO BRASIL/INGLÊS	223
ÍNDICE REMISSIVO	225

João Madeiras Pereira

Professor Associado do Departamento de Engenharia Informática do IST¹, onde leciona disciplinas na área de Computação Gráfica e Multimédia. Investigador Sénior no Grupo de Visualização e Interfaces Multimodais Inteligentes no INESC-ID Lisboa², tendo coordenado vários projetos de I&D nacionais e internacionais. Membro (*Senior Member*) das associações IEEE³, ACM⁴ e Eurographics. Autor ou coautor de mais de 140 artigos científicos, publicados em atas de conferências e revistas nacionais e internacionais.

João Brisson

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Informática do IST¹, desde 1998, onde leciona Computação Gráfica e Interfaces Pessoa-Máquina. Foi Professor Convidado da Universidade de Darmstadt (Alemanha) e investigador e consultor do Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung. Foi investigador e Professor do Departamento de Engenharia Mecânica do IST de 1973 a 1998. Participou em várias Comissões de Normalização e realizou diversos projetos para a indústria (SIBS, Brisa, Unisys, Petrolgal, Cimpor, Tabaqueira, entre outras empresas).

António Coelho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Informática da FEUP⁵, onde leciona diversas disciplinas nas áreas de Computação Gráfica, Ciências e Tecnologias da Programação e Jogos Digitais. Investigador Sénior do INESC TEC⁶, onde coordena a área de Computação Gráfica e Ambientes Virtuais do CSIG⁷. Membro da Ordem dos Engenheiros e das associações ACM⁴, Eurographics e GPCG⁸.

Alfredo Ferreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Informática do IST¹, onde leciona disciplinas na área de Computação Gráfica e Multimédia. Desenvolve trabalho de investigação no Grupo de Visualização e Interfaces Multimodais Inteligentes no INESC-ID Lisboa², tendo participado e coordenado vários projetos de investigação nacionais e internacionais. Membro das associações ACM⁴, IEEE³, Eurographics e do GPCG⁸.

Mário Rui Gomes

Professor Associado Agregado do IST¹, onde leciona, desde 1982, a disciplina de Computação Gráfica. Investigador do INESC, desde 1981, e membro fundador do GPCG⁸ e do Colégio de Engenharia Informática da Ordem dos Engenheiros.

¹ Instituto Superior Técnico.

² Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Investigação e Desenvolvimento em Lisboa.

³ Institute of Electrical and Electronics Engineer.

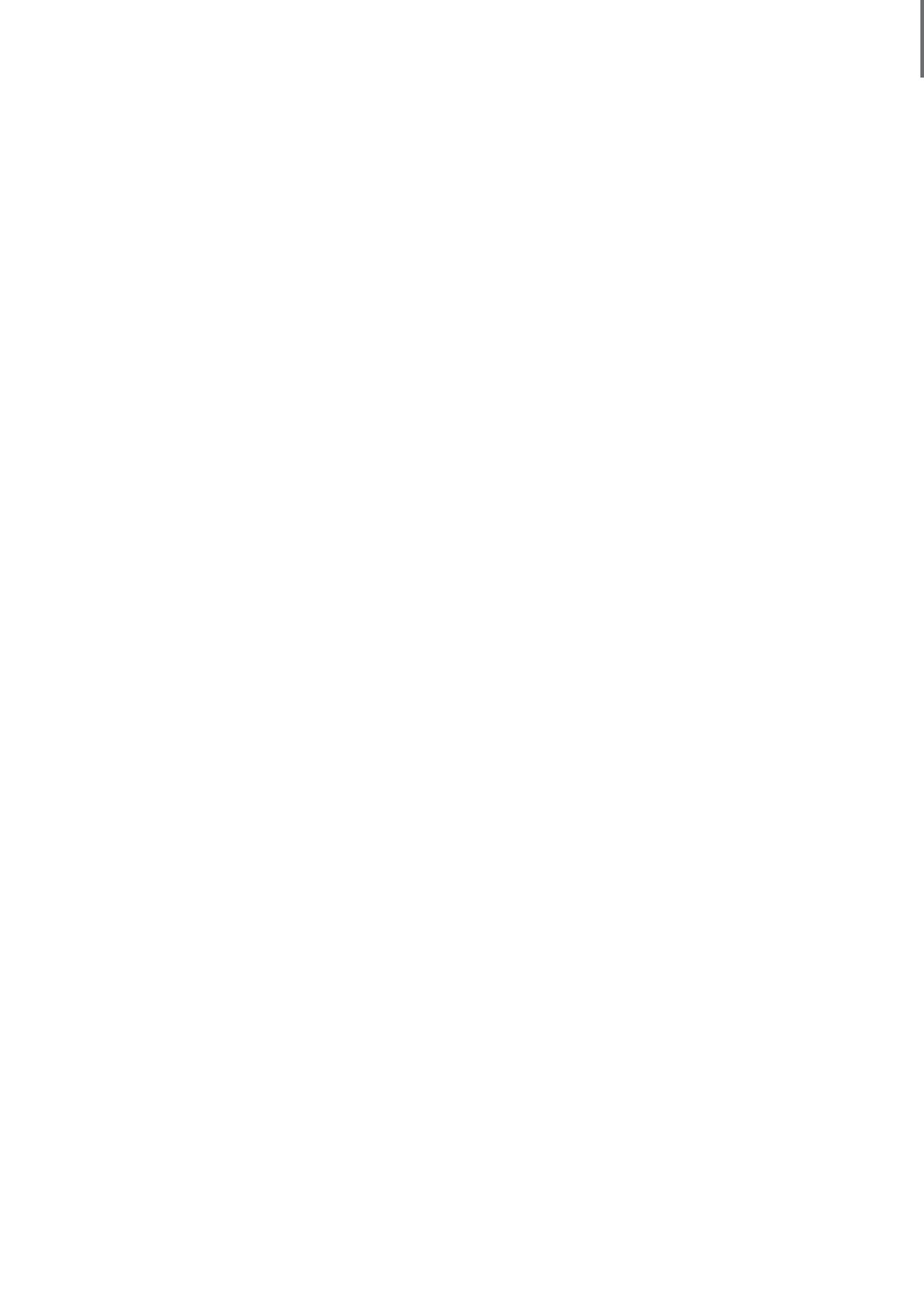
⁴ Association for Computing Machinery.

⁵ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

⁶ Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência.

⁷ Centro de Sistemas de Informação e Computação Gráfica.

⁸ Grupo Português de Computação Gráfica.



Em março de 1972 (portanto, há mais de 45 anos!), regi, integrado na série dos Cursos de Especialização do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), em Lisboa, o curso Introdução à Computação Gráfica. Tinha, então, acabado o meu doutoramento na Technische Universität Berlin, na Alemanha, em 1970, e era, na altura, um dos poucos especialistas a nível internacional desta disciplina emergente.

A Computação Gráfica, uma nova ciência baseada na tecnologia de computadores digitais, sua programação e suas aplicações, nasceu da Informática. Consequentemente, novas faculdades e departamentos começaram a proliferar e a ser instalados nas universidades pelo mundo fora. Uma vez que a Computação Gráfica é a disciplina que, por um lado, se dedica aos sistemas, métodos matemáticos, estruturas de dados, algoritmos e tecnologias que permitem transformar os dados (números) processados pelos computadores digitais em imagens e que, por outro lado, permite a interação e a interpretação dessas imagens pelo utilizador, com o tempo, foi-se transformando numa importante disciplina da Informática, não só com mérito científico próprio, mas também com a mais-valia de possuir um carácter de *enabling technology*, isto é, ser uma disciplina e tecnologia que, como ferramenta, permite realizar inúmeras aplicações através de computadores, sem a qual estas não poderiam ser implementadas. O mundo é visual, por isso, a Informática e as suas aplicações necessitam da Computação Gráfica como tecnologia e como ferramenta.

O texto do Curso 138 foi editado e publicado como um pequeno livro (78 páginas) pelo LNEC, em junho de 1974. Que eu saiba, foi um dos primeiros, senão o primeiro “livrinho” de Introdução à Computação Gráfica em língua portuguesa.

Introdução à Computação Gráfica mostra, passados mais de 45 anos, a maturidade e diversidade dos seus atuais fundamentos como disciplina da Informática. O conteúdo do presente livro é de alta qualidade, comparável a livros reconhecidos como *standard text books* da área a nível internacional escritos em inglês (como o de A. van Dam et. al.), em alemão (como o de J. L. Encarnação, W. Strasser & R. Klein) e noutros idiomas.

A obra concentra-se no chamado *output and visualization pipeline* e é composta por nove capítulos. Os três primeiros apresentam os conceitos básicos e as transformações geométricas, nos Capítulos 4 a 6 são tratadas as técnicas de processamento geométrico e nos Capítulos 7 a 9 discutem-se os métodos de processamento e representação de imagens de uma forma realista. Dois anexos concluem o conteúdo do livro, descrevendo os elementos básicos e os formatos utilizados no texto.

A estrutura do livro, com resumo, bibliografia e exercícios em cada um dos capítulos, mostra a vasta experiência dos autores no ensino desta disciplina nas instituições em que são Professores. O conteúdo é muito completo em relação ao *core* da disciplina em si, abrindo também ao estudante a possibilidade de entrar levemente e de forma periférica nos temas adjacentes, sem, no entanto, os aprofundar.

A elevada qualidade do livro demonstra a qualificação dos autores, que são reconhecidos especialistas desta disciplina. Conheço-os pessoalmente e tenho acompanhado o seu trabalho, o de alguns deles há décadas, e estou absolutamente convencido da sua competência como investigadores em Computação Gráfica e da sua experiência no ensino desta disciplina. Isso garantiu a excelência do conteúdo técnico apresentado e a sua qualidade pedagógica.

O número de universidades que, em Portugal, ensinam Computação Gráfica cresceu largamente nas últimas décadas, tal como o número de estudantes que se querem especializar nesta disciplina. Devido ao vasto espectro de aplicações da Computação Gráfica nas mais diversas áreas, nem todos os estudantes se dão por satisfeitos com um livro de texto escrito em língua inglesa. Por isso, é fundamental publicar este livro em português.

Uma vez que a Computação Gráfica também é de grande relevância nos outros países de língua portuguesa (especialmente no Brasil), este livro vai encontrar certamente aí o seu lugar no ensino desta disciplina. Tal significa que vai ter o seu mercado e um forte impacto no ensino e na continuação do desenvolvimento da Computação Gráfica nessas regiões.

Agradeço aos autores e à editora pela oportunidade de poder contribuir com este pequeno Prefácio para um livro que, por todas as razões que indiquei, será, seguramente, um sucesso como livro de texto no ensino desta importante disciplina da Informática no mundo de língua portuguesa. Parabéns aos autores por este ótimo trabalho.

Professor Dr.-Ing. José Luis Encarnação

INTRODUÇÃO

Nos nossos dias, é difícil encontrar uma interação com a informação que não se realize através de uma interface gráfica, à qual está sempre subjacente a Computação Gráfica. Com efeito, esta permeia toda a interação, quer estejamos simplesmente a consultar informação na *World Wide Web*, a trabalhar um texto ou uma folha de cálculo ou a criar uma nova aplicação num ambiente de desenvolvimento.

A Computação Gráfica está igualmente subjacente a toda a atividade de entretenimento, quer este seja um jogo simples num dispositivo móvel ou um jogo complexo, pleno de realismo.

As atividades de trabalho e de entretenimento são-nos proporcionadas através das mais variadas plataformas, desde ecrãs em relógios de pulso a grandes ecrãs de parede, passando, naturalmente, pela generalidade dos dispositivos móveis, por computadores portáteis e de secretária e televisores.

Em todos estes dispositivos impera a Computação Gráfica, sob uma multitude de diferentes normas que foram sucessivamente surgindo ao longo dos últimos 60 anos. O recém-chegado a este mundo de interação raramente se apercebe do processamento gráfico que se encontra por detrás de toda a interação, tão comum é o seu emprego.

Porém, de quando em vez, surge a pergunta de como se chegou ao presente desenvolvimento do processamento gráfico e que princípios, conceitos e normas existem no seu âmago. Responder detalhadamente a esta pergunta levar-nos-ia numa interessante viagem através das últimas décadas da Computação Gráfica, começando pelos ecrãs de texto e terminando nos mais recentes dispositivos de Realidade Virtual e Aumentada.

No entanto, tal seria demasiado exaustivo para um livro que pretende ser introdutório. Assim, esta obra tem por principal objetivo conduzir o leitor num percurso exploratório dos princípios, dos conceitos e das bases da Computação Gráfica interativa. Como tal, não é nossa intenção sermos exaustivos e cobrirmos todos os temas, princípios e algoritmos. Existem obras complementares onde o leitor poderá aprofundar os tópicos aqui introduzidos.

O foco deste livro encontra-se nos conceitos, nos princípios e nos algoritmos que foram surgindo ao longo do tempo e que hoje constituem o *corpus* fundamental da Computação Gráfica e que com ela se confundem e dela são indissociáveis.

1.1 A QUEM SE DESTINA O LIVRO

Este livro destina-se a alunos de graduação e profissionais que, possuidores de conhecimentos de programação, geometria e matemática, pretendam encontrar um texto introdutório à Computação Gráfica que lhes permita uma primeira abordagem de forma clara e sucinta.

Por forma a garantir que o conteúdo aqui apresentado é genérico, todos os algoritmos são independentes de qualquer linguagem de programação ou sistema gráfico. O leitor é assim convidado a explorar a Computação Gráfica no ambiente que mais lhe convier.

Foi nosso propósito incluir um formalismo matemático essencial, no sentido de proporcionar ao leitor um texto mais claro, resultando numa mais fácil aprendizagem.

1.2 ESTRUTURA DO LIVRO

O presente livro encontra-se organizado em 9 capítulos, os quais abordam os seguintes temas:

- Capítulo 1, “Introdução”, faz uma primeira abordagem aos objetivos gerais deste livro e respetiva audiência, apresentando a sua organização;
- Capítulo 2, “Conceitos Fundamentais”, apresenta os conceitos fundamentais da Computação Gráfica e dispositivos gráficos e faz uma primeira abordagem ao processamento e às aplicações gráficas, à descrição de cenas e à síntese de imagens;
- Capítulo 3, “Transformações Geométricas”, conduz o leitor pelo mundo dos espaços e das transformações geométricas que ocorrem em Computação Gráfica e a sua tradução em operações matriciais;
- Capítulo 4, “Modelação”, aborda a construção de cenas e dos objetos nelas contidos, e a sua definição, composição e manipulação;
- Capítulo 5, “Processamento Geométrico”, descreve, na generalidade, as operações a que os objetos de cena são sujeitos, desde a sua visualização por uma câmara, até à apresentação final de imagens em dispositivos, introduzindo um modelo genérico de câmara virtual, os vários espaços envolvidos e as transformações entre eles;
- Capítulo 6, “Recorte”, trata do processamento que procede à eliminação dos objetos e de partes de objetos que ficam fora dos volumes visualizados, apresentando os algoritmos mais relevantes deste processo;
- Capítulo 7, “Iluminação e Sombreamento”, introduz o modelo de iluminação local de Phong e aborda, em detalhe, as principais técnicas de sombreamento;
- Capítulo 8, “Discretização”, trata da representação de primitivas gráficas (linhas, polígonos, texturas, etc.) nos dispositivos de saída gráfica e da composição de imagens;
- Capítulo 9, “Fotorrealismo”, aborda o tema da síntese de imagens por metodologias que permitem um maior realismo: *ray tracing* e radiosidade.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

João Madeiras Pereira e João Brisson

SUMÁRIO

Este capítulo introduz um conjunto de conceitos básicos subjacentes a um sistema gráfico ao nível do *hardware* e do *software*. O tema central é a descrição dos blocos fundamentais que compõem uma arquitetura gráfica *raster*, bem como a apresentação do *pipeline* de visualização como estratégia fundamental no processo de síntese de imagem.

A cor é uma característica essencial da visão e, conseqüentemente, é-lhe dedicado o final deste capítulo, onde a cor é analisada e são apresentados os modelos de cor que os dispositivos gráficos empregam.

OBJETIVOS

- Conhecer os componentes de um sistema gráfico.
- Conhecer os blocos fundamentais de uma arquitetura gráfica *raster*.
- Conhecer o tipo de informação contida na descrição de uma cena.
- Entender os conceitos associados à janela de visualização e ao *viewport*.
- Entender as tarefas realizadas no *pipeline* de visualização.
- Introduzir a cor, respetivos modelos e seu emprego pelos dispositivos.

2.1 DISPOSITIVOS GRÁFICOS

Os dispositivos gráficos desempenham um importante papel na Computação Gráfica, não só por permitirem a interação dos utilizadores com as aplicações gráficas, mas também por estarem diretamente relacionados com a evolução destas aplicações.

A evolução dos dispositivos gráficos influencia decisivamente o desenvolvimento das aplicações gráficas, nomeadamente ao nível da interface, pois permite que se criem novos paradigmas de interação. O dispositivo **rato** constitui um exemplo paradigmático da afirmação anterior, na medida em que foi um elemento determinante na criação dos sistemas baseados em “janelas”, predominantes nas atuais aplicações gráficas.

Por outro lado, as necessidades crescentes exibidas pelas aplicações gráficas também estimulam o desenvolvimento de novos equipamentos. Um exemplo da influência das aplicações gráficas na evolução dos equipamentos foi o aparecimento dos dispositivos de tecnologia **raster** (matricial), como resposta ao objetivo de produzir imagens de alta qualidade, o mais fiel e aproximadamente possível da realidade.

Exemplos mais recentes são o desenvolvimento de equipamentos para interação em aplicações de Realidade Virtual.

2.1.1 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO

Os dispositivos gráficos podem ser classificados segundo critérios diversos.

Em termos de **funcionalidade**, classificam-se da seguinte forma:

- **Dispositivos de entrada:** São aqueles cuja função é captar informações para as aplicações;
- **Dispositivos de processamento:** São dispositivos que apresentam arquiteturas especiais destinadas à manipulação e ao processamento de objetos gráficos;
- **Dispositivos de saída ou de visualização:** São responsáveis pela exibição dos objetos gráficos.

Outro critério de classificação dos dispositivos gráficos respeita ao **formato de dados** utilizado no respetivo desenho. Neste critério, os dispositivos classificam-se como **vetoriais** e **raster**. Sublinhe-se que o termo *raster* é um sinónimo de **matriz**. Daí a designação alternativa de dispositivos matriciais dada a este tipo de equipamentos.

No formato vetorial, a informação geométrica dos objetos gráficos é definida num domínio contínuo. Alguns exemplos de objetos gráficos definidos vetorialmente são: segmentos de reta definidos através das coordenadas dos seus pontos extremos; polígonos definidos por uma sequência de pontos com as suas respetivas coordenadas; círculos definidos através das coordenadas do seu centro e do seu raio; e curvas paramétricas definidas através das coordenadas dos seus pontos de controlo.

No formato *raster*, por outro lado, os objetos gráficos são definidos num domínio discreto. Este é representado por uma matriz de quadrícula, ou **píxeis** (*picture elements*), que podem ser iluminadas com uma determinada cor. Um píxel tem uma área retangular, pelo que a sua posição é fornecida pelas coordenadas inteiras 2D do centro da quadrícula. O número de linhas define a resolução vertical e o número de quadrículas por linha define a resolução horizontal. A **resolução gráfica** de um dispositivo *raster* define-se através do produto da resolução horizontal pela resolução vertical. Os objetos gráficos são definidos à custa da ativação de um conjunto de quadrículas dessa matriz que reproduz com maior ou menor fidelidade a sua geometria. Este processo de rasterização dos objetos gráficos tem implícito um problema de ruído (*aliasing*), que caracteriza qualquer processo de conversão de um espaço contínuo num espaço discreto. A Figura 2.1 apresenta um círculo representado vetorial e matricialmente.

TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

António Coelho e Alfredo Ferreira

SUMÁRIO

Nos capítulos anteriores, foram introduzidos os conceitos fundamentais. Neste apresentamos um dos tópicos que serve de base à Computação Gráfica: as transformações geométricas. Em Computação Gráfica, qualquer cena pode ser, em última análise, definida em termos de primitivas gráficas e suas relações. Estas primitivas podem existir num espaço bidimensional ou tridimensional, consoante o contexto. Na prática, é através da aplicação de transformações geométricas a primitivas gráficas que conseguimos criar cenas complexas e representá-las num ecrã. A variação dos parâmetros destas transformações no tempo permite a síntese de animações. Se esta variação de conteúdo for calculada com base em princípios da cinemática, as animações resultantes são fisicamente corretas e produzem resultados bastante realistas.

Neste capítulo, iremos descrever as principais transformações geométricas e o modo como afetam a apresentação de primitivas. Veremos como as transformações geométricas elementares podem ser combinadas de modo a fornecerem um mecanismo genérico, flexível e poderoso de manipulação de primitivas. Com este mecanismo, qualquer transformação passa a poder ser descrita como uma combinação de transformações geométricas elementares. Após a leitura deste capítulo, ficará clara para o leitor a importância fundamental das transformações geométricas na Computação Gráfica.

OBJETIVOS

- Conhecer as transformações geométricas elementares.
- Compreender os efeitos da aplicação destas transformações a primitivas geométricas.
- Saber como se podem combinar as transformações geométricas para definir cenas complexas.

3.1 PONTOS E SISTEMA DE COORDENADAS

Consoante o sistema gráfico em uso, podem ser considerados diversos tipos de objetos geométricos, tais como poliedros, superfícies, polígonos, linhas ou pontos. Sendo o mais simples de todos, o ponto é de importância fundamental na definição e na representação de todos os objetos geométricos. Por exemplo, tal como ilustrado na Figura 3.1,

uma linha (ou segmento de reta)¹ é, geralmente, definida por dois pontos, **A** e **B**, os seus extremos; um quadrilátero pode ser definido por uma sequência de pontos, **V**₁ a **V**₄, que definem os vértices correspondentes ao seu contorno.

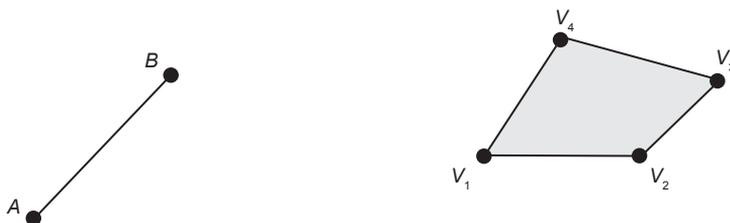


FIGURA 3.1 – LINHA DEFINIDA POR DOIS PONTOS E POLÍGONO DEFINIDO POR QUATRO PONTOS

Um ponto no espaço não tem forma nem tamanho, sendo apenas definido pela sua posição. Num espaço unidimensional, esta posição corresponde a um escalar, que representa a distância a um outro ponto de referência. Em espaços de dimensão igual ou superior a dois², para se representar a posição de um ponto é utilizado um vetor; o seu comprimento corresponde à distância a um ponto de referência e a sua direção corresponde à orientação em que essa distância é medida, conforme ilustrado na Figura 3.2. Neste exemplo, o ponto **B** é definido com base no ponto **A** e no vetor **v**. Esse vetor tem dimensão igual à do espaço onde se está a trabalhar. Neste caso, se assumirmos que os pontos **A** e **B** estão no espaço bidimensional, o vetor **v** é um vetor coluna com dois componentes. Se considerarmos um espaço de três ou quatro dimensões, o vetor coluna **v** terá três ou quatro componentes, respetivamente.

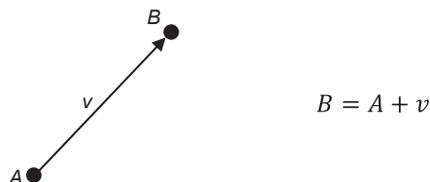


FIGURA 3.2 – DEFINIÇÃO DE UM PONTO COM BASE NUM PONTO DE REFERÊNCIA E NUM VETOR

Ao utilizarmos como ponto de referência para definir pontos num espaço Euclideano a origem de um referencial ortogonal, estamos a trabalhar com um sistema de coordenadas cartesiano. Assim sendo, torna-se fácil definir as posições dos pontos no espaço, com base nesse sistema de coordenadas. Um referencial ortogonal num espaço **n**-dimensional terá **n** eixos, ortogonais entre si por definição. Para se identificar a posição de um ponto segundo esse sistema de coordenadas, determina-se a menor distância do ponto a cada um desses eixos, obtendo-se, assim, as coordenadas do ponto. Com essas coordenadas, constrói-se um vetor de **n** dimensões que representa o ponto, como ilustrado na Figura 3.3. Neste exemplo, o ponto **P** em A encontra-se no espaço unidimensional, em B no espaço bidimensional e em C no espaço tridimensional. No espaço unidimensional, este ponto é representado por um escalar; nos restantes espaços multidimensionais, é representado por um vetor coluna.

¹ Em Computação Gráfica é usual designar um segmento de reta por linha, sem prejuízo da correta definição desta última.

² Neste livro, consideraremos espaços de duas, três e quatro dimensões.

4

MODELAÇÃO

João Brisson e António Coelho

SUMÁRIO

Tal como vimos no Capítulo 2, as aplicações de Computação Gráfica produzem representações sintéticas de cenas. Para que estas representações sejam possíveis, é necessário descrever as cenas através dos objetos que as constituem, isto é, é necessário modelar os objetos compondo as cenas através das suas propriedades, nomeadamente as propriedades geométricas. Neste capítulo, abordam-se diversos tipos de modelação geométrica dos objetos, desde a instanciação de primitivas, até à representação por malhas poligonais. Esta última representação será objeto de especial atenção, uma vez que, antes do processamento geométrico pelo *pipeline* de visualização, a tesselação dos objetos de cena produz malhas de polígonos que descrevem as fronteiras dos objetos.

A segunda parte deste capítulo aborda a utilização de funções polinomiais para aproximação rigorosa de curvas e de superfícies. Os polinómios de grau 3 são os mais utilizados, particularmente nas curvas de Hermite e de Bézier.

OBJETIVOS

- Apresentar as principais representações geométricas de objetos e identificar a representação mais adequada face às necessidades de modelação dos objetos.
- Modelar geometricamente um objeto tridimensional através de um determinado tipo de representação geométrica.
- Identificar a vantagem da utilização de polinómios de grau 3 para a aproximação de curvas, classificar a continuidade geométrica e paramétrica entre dois segmentos de curva e desenhar e calcular curvas de Hermite e de Bézier.
- Generalizar os vetores geométricos das curvas de Hermite e de Bézier para superfícies.

4.1 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA

O processamento gráfico dos objetos realiza-se através de uma sequência de operações que parte da definição da geometria e das propriedades dos objetos, tais como cor e transparência. Este conjunto de dados constitui a representação abstrata do objeto, o seu modelo. O conjunto de operações que definem a geometria e as propriedades dos objetos

configuram a modelação geométrica dos objetos, em que propriedades como cor, volume, massa, textura e acabamento de superfícies estão intimamente relacionadas com a geometria.

A modelação geométrica com base em formas geométricas simples apresenta uma enorme potencialidade de representação, sendo possível representar objetos mais ou menos complexos a partir de tais formas simples às quais são atribuídas propriedades como cor e textura. A generalidade do *software* de modelação permite representar objetos em cenas tridimensionais extremamente complexas, com grande realismo e a partir de formas geométricas como paralelepípedos, cones e esferas, entre outras.

As aplicações de **CAD** (**Computer Aided Design**, ou, em português, **Conceção Assistida por Computador**), no campo da arquitetura, por exemplo, permitem aos arquitetos transferir a sua conceção dos espaços para modelos que, seguidamente, serão refinados por alteração da geometria e das suas propriedades visuais, adicionando ou retirando objetos, acrescentando pormenores, etc. A visualização dos modelos permite verificar as consequências destas ações, explorar os espaços modelados e avaliar a sua funcionalidade e estética.

A modelação geométrica permite também definir formas e propriedades dos objetos antes de os mesmos serem manufacturados e determinar que processos deverão ser empregues no seu fabrico. Os modelos assim construídos podem ser utilizados na simulação do seu comportamento para determinar a resistência às solicitações mecânicas e térmicas a que os objetos serão sujeitos durante a sua vida útil.

O **CAM** (**Computer Assisted Manufacturing**, ou **Fabrico Assistido por Computador**) parte dos modelos dos objetos a fabricar e define os processos de fabrico, incluindo detalhes tais como a trajetória das ferramentas de corte, e determina e transmite às máquinas ou robôs as instruções correspondentes às ações que deverão executar no fabrico das peças.

A modelação geométrica desempenha também um papel importante na modelação conjunta de objetos com componentes móveis e na montagem desses componentes. Como exemplos poderemos citar os casos de caixas de transmissão de movimento, o funcionamento de articulações e a montagem de elevadores de vidros em portas de automóveis. Nestes casos, é necessário determinar se as peças se ajustam convenientemente, se os movimentos podem ser realizados sem colisões e se existe acessibilidade para montar os componentes.

Finalmente, a modelação deve ter em conta o realismo das representações dos objetos. A cor e a intensidade luminosa com que os objetos são visualizados dependem das interações da luz com os objetos, expressa através das suas propriedades óticas de reflexão e de transmissão.

Assim, a modelação geométrica de sólidos tem de corresponder a necessidades várias que dependem dos fins em vista. Esta diversidade conduziu ao aparecimento de tipos variados e específicos de representação. Como resultado, não existe nenhuma representação universal.

PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO

João Madeiras Pereira

SUMÁRIO

Este capítulo descreve as operações executadas pela sequência de andares de cálculo que integram o bloco de processamento geométrico do *pipeline* de visualização introduzido no Capítulo 2. Aborda-se ainda o modelo de câmara virtual simples, que define a interface de visualização que uma API gráfica disponibiliza ao utilizador.

OBJETIVOS

- Identificar as tarefas realizadas pelo bloco de processamento geométrico do *pipeline* de visualização.
- Conhecer a interface de visualização baseada no modelo de câmara virtual simples.
- Conhecer os espaços coordenados envolvidos no processamento geométrico.
- Calcular as matrizes de dimensão 4 x 4 que descrevem as diversas transformações realizadas ao longo deste bloco.

5.1 OPERAÇÕES DE PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO

Como referido no Capítulo 2 e ilustrado na Figura 2.5, o bloco de processamento geométrico do *pipeline* de visualização recebe os vértices das primitivas simples (linhas, pontos ou polígonos), descritos no sistema coordenadas do mundo, e executa uma sequência de andares de cálculo, de modo a construir as primitivas do dispositivo cujos vértices estão mapeados no referencial tridimensional denominado sistema de coordenadas do dispositivo. Como se irá explicar adiante, cada vértice destas primitivas possui uma posição 3D, em que as duas primeiras coordenadas representam a posição 2D do centro de uma quadrícula de ecrã do *viewport* e a terceira coordenada indica um valor de profundidade que será utilizado, posteriormente, em cálculos de visibilidade no bloco de discretização.

A execução deste bloco, por parte de um sistema gráfico, permite a construção de uma vista arbitrária 3D sobre uma cena.

O fluxo de atividade no bloco de processamento geométrico, ilustrado na Figura 5.1, é descrito pela seguinte sequência de andares de cálculo:

1. Transformação de visualização.
2. Cálculos de iluminação nos vértices.
3. Transformação de projeção.
4. Algoritmo de recorte.
5. Transformação de *viewport*.

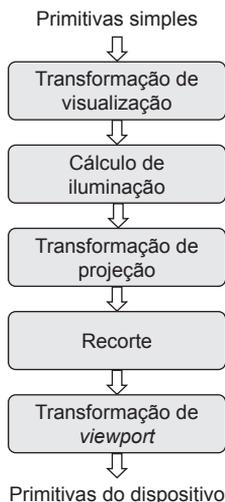


FIGURA 5.1 – OPERAÇÕES DE PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO

Após descrição do paradigma da câmara virtual que modela a interface com um sistema gráfico baseado no *pipeline* de visualização, detalhar-se-ão, nas seções seguintes, as operações realizadas em cada um dos andares acima mencionados, com exceção dos andares de recorte e de cálculo de iluminação, que serão abordados nos Capítulos 6 e 7, respetivamente. Resumidamente, o objetivo do andar de cálculo de iluminação consiste em determinar a informação de cor (tuplo RGB) em cada um dos vértices de uma primitiva gráfica, tendo em conta as fontes de luz presentes no modelo da cena e as propriedades do material dessa primitiva. O andar de recorte identifica e aceita os objetos que se encontram total ou parcialmente dentro de um volume de visualização, implicando o seu recorte. Objetos que se localizem fora desse volume serão imediatamente rejeitados.

5.2 MODELO DE CÂMARA VIRTUAL SIMPLES

O tipo de interface que uma API gráfica disponibiliza ao utilizador é um aspeto fundamental, pois define o modo de visualização de uma determinada cena. Esta interface consiste na especificação de um conjunto normalizado de parâmetros, através dos quais o sistema gráfico define uma transformação que mapeia as coordenadas dos pontos definidos no

6

RECORTE

João Brisson e Mário Rui Gomes

SUMÁRIO

No *pipeline* de visualização, a sequência de transformações de visualização e de projeção e a operação de homogeneização transformaram as primitivas simples do espaço dos objetos para um espaço canônico (homogeneizado).

A operação seguinte, o recorte (*clipping*), visa identificar se as primitivas simples se encontram totalmente dentro, totalmente fora ou parcialmente dentro do volume canônico, para eliminar o que não se encontre dentro deste volume e é invisível. O volume canônico desempenha agora a função de volume de recorte.

Neste capítulo, apresentamos algoritmos para o recorte de segmentos de reta e de polígonos convexos ou côncavos. Por facilidade de exposição, a sua descrição é feita em 2D, mas a sua extensão a 3D é imediata. Não se aborda o recorte de pontos simples porque, quando fora do volume de recorte, a sua eliminação é trivial.

OBJETIVOS

- Introduzir o recorte de segmentos de reta e de polígonos no *pipeline* de visualização.
- Identificar os vários tipos de utilização dos algoritmos de recorte de segmentos de reta e de polígonos.
- Identificar as situações em que cada algoritmo deve ser aplicado.
- Descrever os algoritmos mais relevantes.

Em Computação Gráfica, existem muitos e variados modelos de representação. Todas estas representações são convertidas em primitivas simples (pontos, segmentos de reta e polígonos) antes de serem processadas pelo *pipeline* de visualização. Após a transformação de projeção e a operação de homogeneização, estas primitivas podem ou não encontrar-se dentro do volume canônico, isto é, serem ou não visíveis. Há, então, que eliminar as primitivas ou partes de primitivas que se encontrem fora do volume canônico, através do seu recorte por meio dos denominados algoritmos de recorte.

Por simplicidade de exposição, os algoritmos que apresentaremos serão descritos em 2D. A sua extensão a 3D que, em geral, é simples, fica a cargo do leitor, a título de exercício.

Como veremos, os algoritmos de recorte têm, em Computação Gráfica, outras aplicações para lá de permitirem escolher as partes dos objetos que se encontram no interior do volume de recorte.

6.1 RECORTE DE SEGMENTOS DE RETA

O recorte de segmentos de reta consiste em identificar os valores das coordenadas x , y e z , que correspondem aos pontos de intersecção com cada uma das faces do volume de recorte, caso esses pontos existam.

Por facilidade expositiva, consideraremos unicamente o recorte efetuado por um retângulo no espaço bidimensional. Este retângulo passará a ser designado por retângulo de recorte, como pode ser observado na Figura 6.1.

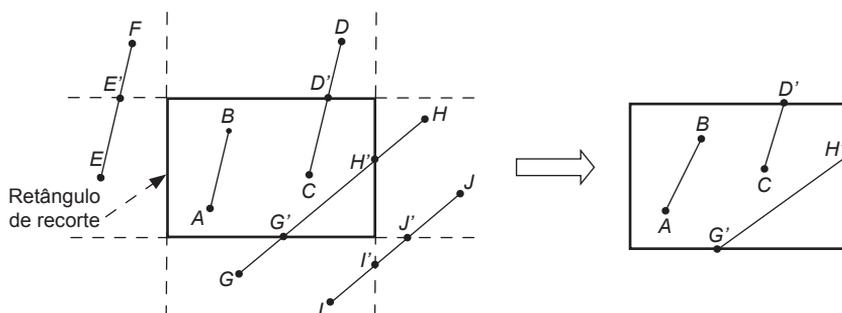


FIGURA 6.1 – RECORTE DE SEGMENTOS DE RETA POR UM RETÂNGULO DE RECORTE

Em polígonos convexos (todos os ângulos internos inferiores a 180°), como os retângulos, pode ser usada a propriedade geométrica que garante que se os dois vértices de um segmento de reta estiverem dentro do polígono, então todo o segmento de reta está dentro do polígono.

Assim, um vértice de coordenadas (x, y) encontra-se dentro de um retângulo quando se verificarem, simultaneamente, as duas condições seguintes:

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x \leq x_{\max} \\ y_{\min} &\leq y \leq y_{\max} \end{aligned} \quad (6.1)$$

No caso do segmento de reta AB da Figura 6.1, como ambos os vértices se encontram dentro do retângulo de recorte, todo o segmento de reta se encontra também dentro dele, pelo que o segmento de reta pode ser aceite sem ser recortado.

Se ambos os vértices estiverem fora do retângulo de recorte, o segmento de reta pode estar completamente fora (caso do segmento EF) e ser trivialmente rejeitado. No caso do segmento GH , que tem ambos os vértices fora do retângulo de recorte, tem de ser efetuado o recorte.

ILUMINAÇÃO E SOMBREAMENTO

João Madeiras Pereira, João Brisson e Mário Rui Gomes

SUMÁRIO

As fontes de luz iluminam as cenas com luz que interage com as superfícies dos objetos de cena e é refletida, transmitida e absorvida consoante as características das superfícies, os tipos das fontes de luz e a sua distância aos objetos de cena. A modelação da iluminação por modelos fisicamente corretos, os modelos de iluminação global, tem em conta todas estas formas de interação da luz com os objetos, nomeadamente a luz multiplamente refletida, e proporciona a síntese de imagens de excelente realismo à custa de um elevado esforço computacional. Estes modelos são utilizados na síntese de imagens por fotorrealismo, que abordaremos no Capítulo 9.

Por seu lado, os modelos de iluminação local introduzem simplificações à modelação da interação da luz com as superfícies, proporcionando a síntese de imagens de qualidade aceitável com um esforço computacional muito menor. Os modelos de iluminação local consideram que a interação com a luz em cada local resulta unicamente da interação com a luz proveniente das fontes de luz que iluminam diretamente o local e ignoram a luz que provém de reflexões múltiplas ou por transmissão. Neste capítulo apresentaremos o modelo de reflexão de Phong modificado por Blinn, ou modelo de reflexão de Blinn-Phong.

O cálculo da iluminação para atribuir uma cor a todos os fragmentos que resultam de uma primitiva simples, como um polígono, pode revelar-se computacionalmente pesado. Para diminuir este peso computacional e acelerar o processamento, foram desenvolvidas várias técnicas de sombreamento que interpolam a informação da cor de alguns fragmentos para os restantes. Neste capítulo, analisaremos os sombreamentos constantes, de Gouraud e de Phong.

OBJETIVOS

- Introduzir os conceitos associados a fontes de luz, iluminação, reflexão e sombreamento.
- Apresentar em detalhe o modelo de reflexão de Blinn-Phong.
- Apresentar as técnicas de sombreamento constante, de Gouraud e de Phong, suas vantagens e desvantagens.

7.1 FONTES DE LUZ

Existem variados modelos de fonte de luz. Em geral, estes modelos consideram parâmetros como a intensidade emitida, a posição da fonte de luz, a atenuação da intensidade com a distância à sua posição, a direção em que a luz é emitida, a cor e as características geométricas da luz. Os modelos de fonte de luz mais simples e comuns são:

- **Luz ambiente:** Fonte de luz sem posição nem direção definidas, de intensidade constante, independente da direção e sem atenuação;
- **Fonte de luz direcional:** Fonte de luz sem localização precisa (ou no infinito), sem atenuação da intensidade luminosa com a distância e cujos raios luminosos são paralelos, possuindo uma direção precisa, muito utilizada na modelação da luz solar;
- **Fonte de luz pontual:** Fonte de luz localizada numa posição do espaço que radia igualmente em todas as direções, com atenuação da intensidade luminosa em função da distância, diminuindo com esta;
- **Spotlight:** Fonte de luz semelhante à luz pontual, em que a emissão de luz se encontra limitada a um ângulo sólido de abertura variável (θ), cujo eixo é a direção de emissão. A intensidade luminosa é atenuada radialmente em função do ângulo entre os raios luminosos emitidos e a direção central de emissão, usualmente aproximada por funções como $\cos^2 \phi$ com $0 \leq \phi \leq \theta$ (ver Figura 7.1), em que θ é o ângulo máximo de abertura do feixe emitido, podendo também ser atenuada com a distância, diminuindo com esta. Poderá, ainda, existir uma zona de penumbra na zona mais exterior do feixe de luz emitido.

Neste capítulo não faremos distinção entre fontes de luz, exceto quando introduzirmos a componente ambiente do modelo de reflexão de Blinn-Phong e quando abordarmos a atenuação da intensidade luminosa com a distância das fontes de luz aos objetos, no mesmo modelo.

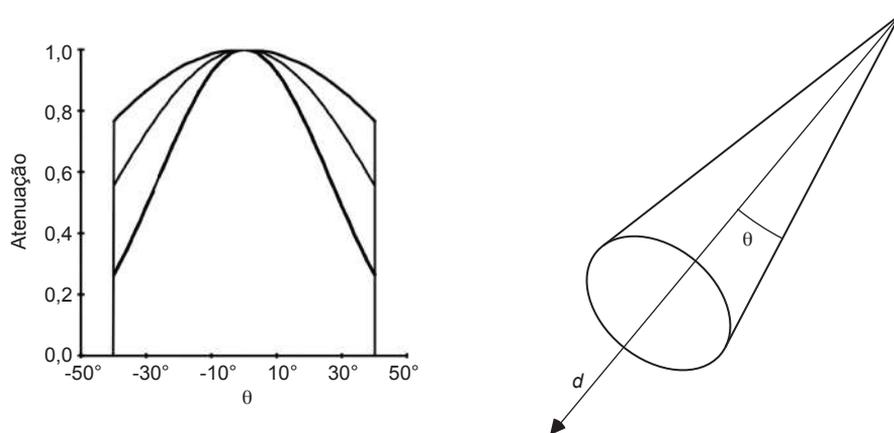


FIGURA 7.1 – ATENUAÇÃO RADIAL EM FONTE DE LUZ DO TIPO *SPOTLIGHT*

8

DISCRETIZAÇÃO

João Madeiras Pereira e João Brisson

SUMÁRIO

Este capítulo descreve as operações executadas pela sequência de andares de cálculo que integram o bloco de discretização do *pipeline* de visualização introduzido no Capítulo 2.

Em particular, será explicado convenientemente o conceito de rasterização, intrínseco aos sistemas gráficos *raster*, bem como o fenómeno de ruído (*aliasing*) decorrente da substituição de informação contínua por informação discreta.

Abordar-se-á a operação de mapeamento de texturas. O cálculo de cor efetuado no bloco de discretização pode implicar, além dos métodos de sombreamento discutidos no Capítulo 7, o acesso a informação de imagens 2D guardadas em ficheiro. Estas imagens designam-se por texturas e o modo como a sua informação é mapeada define o tipo de texturização pretendido.

A solução para a questão da visibilidade também é discutida e apresentada, no sentido de garantir que as primitivas são desenhadas corretamente no *viewport*, em função da sua profundidade.

OBJETIVOS

- Apresentar os algoritmos de rasterização das primitivas gráficas segmento de reta e polígono, e respetivo desempenho.
- Apresentar as técnicas de sombreamento dos fragmentos.
- Introduzir a operação de texturização e as técnicas de *bump mapping* e *environment mapping*.
- Descrever o algoritmo *Z-buffer* para resolução do problema de visibilidade.
- Abordar a questão da translucidez e a função de mistura (*blending*) associada.
- Analisar o fenómeno de *aliasing* e estratégias de minimização das suas consequências.

8.1 OPERAÇÕES DE DISCRETIZAÇÃO

Como referido no Capítulo 2 e ilustrado na Figura 2.3, o bloco de discretização do *pipeline* de visualização converte a informação geométrica das primitivas do dispositivo (linhas, pontos ou polígonos) em píxeis no ecrã com informação de cor. Relembre-se que cada vértice destas primitivas possui uma posição 3D, em que as duas primeiras coordenadas

representam a posição do centro de uma quadrícula de ecrã do *viewport* e a terceira coordenada fornece a informação de profundidade a ser utilizada nos cálculos de visibilidade.

O fluxo de atividade no bloco de discretização, ilustrado na Figura 8.1, é descrito pela seguinte sequência de andares de cálculo:

1. Rasterização (amostragem das primitivas em conjuntos de fragmentos).
2. Cálculo de cor em cada fragmento.
3. Composição dos fragmentos para cálculo dos píxeis na memória de imagem, composta pelo *buffer* de cor e pelo *buffer* de profundidade.

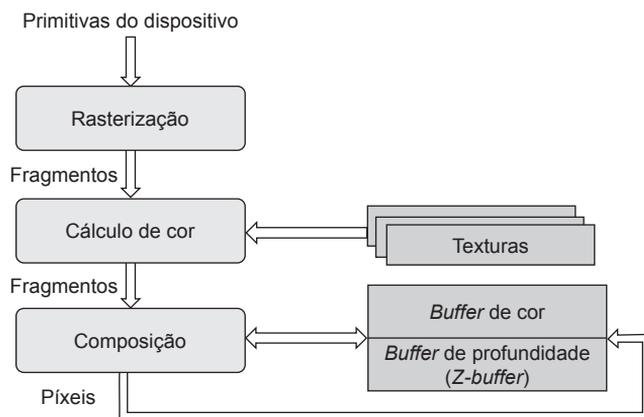


FIGURA 8.1 – OPERAÇÕES REALIZADAS NO BLOCO DE DISCRETIZAÇÃO

Detalhar-se-ão, nas secções seguintes, as operações realizadas em cada um dos andares mencionados.

8.2 RASTERIZAÇÃO

O andar de rasterização é responsável por realizar uma operação de amostragem sobre as primitivas de dispositivo, as quais assumem, geometricamente, a forma de pontos, segmentos de reta ou polígonos convexos. No contexto dos sistemas gráficos *raster*, esta operação de amostragem é designada por **rasterização** ou **conversão por varrimento**. As amostras resultantes são designadas por **fragmentos**.

Um dos objetivos do bloco de discretização é determinar, na imagem final, o conjunto de píxeis do *viewport* que fazem parte da primitiva processada e sombreá-los de forma adequada. Tal significa que cada fragmento é uma estrutura de dados que, pelo menos, contém os seguintes campos, ou atributos: a **posição**, que contém o endereço 2D do centro de uma quadrícula de ecrã; um valor de **profundidade** e uma **cor**. Os atributos de um fragmento relacionam-se com os atributos definidos nos vértices da primitiva. Os atributos dos vértices, além da sua posição, podem ser uma cor, uma normal ou coordenadas de textura, dependendo do tipo de sombreamento que se pretende imprimir na imagem final.

FOTORREALISMO

João Brisson

SUMÁRIO

O *pipeline* de visualização permite produzir imagens a cadências elevadas e a sua animação em tempo real, mas acarreta alguns defeitos e outros artefactos que escapam à observação dos utilizadores, porque a sua afixação é rápida. Por seu lado, o fotorrealismo pretende produzir imagens de alta qualidade o mais fiel e próximo possível da realidade, sem limitações ao tempo de sintetização, permitindo, nomeadamente, a utilização de modelos de iluminação que envolvem reflexões múltiplas, tanto especulares como difusas.

Os dois principais algoritmos do fotorrealismo são os algoritmos de *ray tracing* (traçado de raios) e de radiosidade, que aplicam modelos de iluminação mais completos, ainda que com objetivos diferentes. Os algoritmos de *ray tracing* percorrem o traçado inverso de raios luminosos e consideram a reflexão especular múltipla e a refração da luz. Os algoritmos de radiosidade centram-se na reflexão difusa múltipla. Ambos consideram a transmissão da luz através de meios transparentes e translúcidos.

OBJETIVOS

- Apresentar os algoritmos de *ray tracing*, o traçado de raios e o cálculo da sua intersecção com os objetos de cena, o modelo de iluminação com reflexão especular múltipla e refração, as variantes dos algoritmos e sua otimização.
- Apresentar o algoritmo base da radiosidade, o modelo de iluminação de reflexão difusa múltipla, o método do hemicubo e estratégias de otimização.

9.1 RAY TRACING

O algoritmo de *ray tracing* original foi desenvolvido por Appel, em 1968, com o intuito de determinar sombras. Entre 1968 e 1971, Goldstein e Nagel desenvolveram algoritmos para o cálculo de trajetórias balísticas e de partículas atómicas que, seguidamente, com a adição dos algoritmos desenvolvidos por Appel, foram aplicados à geração de imagens. Em 1979, Kay, completado por Whitted, em 1980, introduziu modificações que permitiram calcular mais corretamente a iluminação especular e a refração da luz.

Apresentamos primeiramente o algoritmo fundamental de *ray tracing* e o cálculo de intersecções entre raios e objetos. De seguida, abordamos a extensão ao modelo de iluminação de Phong, que tem em conta a refração e a transmissão de luz através de corpos transparentes e translúcidos. Apresentam-se, ainda, as principais estratégias de otimização para redução da carga computacional.

9.1.1 O ALGORITMO FUNDAMENTAL DE RAY TRACING

Os algoritmos de *ray tracing* determinam a visibilidade dos objetos de uma cena, operando ao nível da precisão da imagem. O algoritmo fundamental (ver Algoritmo 9.1) considera raios com origem no centro de projeção. Cada um dos raios, denominado raio primário, passa pelo ponto correspondente a uma quadrícula da imagem sobre o plano de projeção da cena a representar (Figura 9.1). A cor de fundo da cena é atribuída à quadrícula se o raio não intersecar qualquer objeto de cena. Caso contrário, determinam-se as intersecções do raio com os objetos de cena e à quadrícula é atribuída a cor do ponto de intersecção mais próximo da origem do raio.

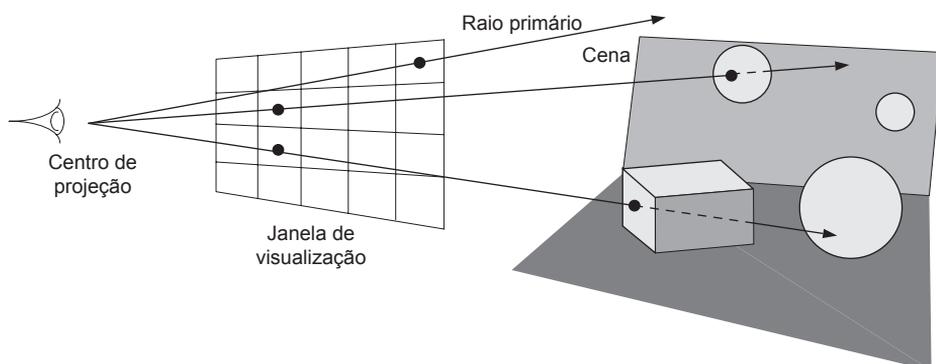


FIGURA 9.1 – RAY TRACING: RAIOS COM ORIGEM NO CENTRO DE PROJEÇÃO PASSAM PELAS QUADRÍCULAS NA JANELA DE VISUALIZAÇÃO E DETERMINAM A SUA COR

O algoritmo realiza implicitamente a remoção de elementos ocultos, pois só o ponto de intersecção mais próximo da origem do raio é visível a partir do centro de projeção. A cor de uma quadrícula depende da iluminação no ponto da cena que o raio atinge e é função da iluminação direta do ponto pelas fontes de luz, da iluminação global (ambiente) da cena e da iluminação devida à luz refletida pelos outros objetos de cena, incidindo no ponto. Tal permite o cálculo implícito de sombras, pois estas são zonas de iluminação fraca. A utilização de modelos de iluminação mais completos do que o modelo de Phong permite ter em conta a iluminação devida à refração da luz, determinando a luz transmitida através do próprio objeto ou de outros objetos, e que ilumina o ponto.