

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Estudo e Análise sobre
Métodos de Interpolação de
Imagens Bidimensionais**

por

Rogério Voges Pinheiro



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

Prof. Anatólio Laschuk
Orientador

Porto Alegre, Outubro de 1994

UFRGS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
BIBLIOTECA

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Pinheiro, Rogério Voges

Estudo e Análise sobre Métodos de Interpolação de Imagens Bidimensionais / Rogério Voges Pinheiro. - Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1994.

117 p. : il.

Dissertação (mestrado)—Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Porto Alegre, 1994. Orientador: Laschuk, Anatólio

Dissertação: Computação Gráfica, Processamento de Imagens Interpolação de Imagens, *Morphing*, *Warping*

Aplicações dos computadores - SBU
 computação gráfica
 Processamento:
 Imagem
 e NPq 1.03.04.002

UFRGS INSTITUTO DE INFORMÁTICA BIBLIOTECA		
N.º CHAMADA 681.327.16(043) P654ES	N.º REG.: 34431	DATA: 11.05.98
ORIGEM: D	DATA: 04.05.98	PREÇO: R\$ 30,00
FUNDO: II	FORN.: II	

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Héglio Casses Trindade

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação: Prof. Dr. Claudio Scherer

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Dr. Roberto Tom Price

Coordenador do CPGCC: Prof. Dr. José Palazzo Moreira de Oliveira

Bibliotecária - Chefe do Instituto de Informática: Zita Prates de Oliveira

Dedico este trabalho a três “mestres” em minha formação:

- à minha mãe Dinah, por ter me ensinado os valores de caráter, respeito e educação e ter me proporcionado instrução mesmo nos momentos difíceis por que passamos;
- ao meu pai Airton, pelas lições de vida e perseverança. Com ele aprendi que a vida é uma constante batalha e que não devemos desistir dos ideais quando encontramos dificuldades. Embora tenhamos nos separado no início desta jornada um dia, em alguma dimensão, tenho certeza de que nos encontraremos novamente;
- à minha avó Adalziza, pelos ensinamentos de respeito às pessoas e por ter me introduzido à matemática e gosto pelas ciências. Graças a ela aprendi a fazer cálculos e a tabuada;

a todos vocês meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao professor Anatólio Laschuk por ter sido mais que um orientador, mas um amigo e pela paciência em resolver minhas dúvidas nos mais diversos momentos em que me ocorreram.

Também agradeço às minhas irmãs Adriana e Angela pela compreensão nas horas difíceis; aos amigos André, Christian, Cleber, Francisco e Leandro, companheiros da *WFD*, pelo apoio e parceria em festas, tão necessárias quando aparecia o cansaço; aos colegas Krug, Menna e Roland pela crítica que me levou a reavaliar os primeiros resultados obtidos; ao professor Navaux por ter me aceito no grupo de arquitetura de computadores, no início do mestrado; à produtora de efeitos especiais *Pacific Data Images*, pelos artigos recebidos; ao professor George Wolberg, pela troca de idéias sobre os algoritmos por ele propostos; à Bárbara por ter me incentivado no início do curso de mestrado; à CAPES pela bolsa de pesquisa, sem a qual não poderia ter me dedicado ao curso e à minha namorada Karen, pela força na elaboração deste trabalho e exemplo de determinação.

Por fim gostaria de prestar meus agradecimentos ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) pela oportunidade de utilização de suas instalações para o desenvolvimento do *software* implementado, bem como aos colegas do CESUP pela ajuda e companheirismo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 O Estado da Arte	18
1.2 Motivação e Objetivos	19
1.3 Estrutura da Dissertação	19
2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS	21
2.1 Introdução	21
2.2 Sinais e Imagens	21
2.3 Transformações Espaciais	24
2.3.1 Definições	25
2.3.2 Mapeamento Direto	26
2.3.3 Mapeamento Inverso	27
2.4 Transformações Afins	29
2.4.1 Transformações Compostas	31
2.5 Teoria da Amostragem	32
2.6 Reamostragem de Imagens	33
2.6.1 Interpolação Linear	35
2.6.2 Interpolação Cúbica	36
2.7 Algoritmos de Linha de Varredura	37

2.7.1	Mapeamento Vetorial	38
2.8	Resumo	39
3	METAMORFOSE DIGITAL ENTRE IMAGENS MORPHING .	41
3.1	Introdução	41
3.2	Deformação de Imagens	41
3.3	Interpolação Cromática	42
3.4	Interpolação de Imagens	43
3.5	Método das Malhas	45
3.5.1	Primeira Etapa	48
3.5.1.1	Fase 1	49
3.5.1.2	Fase 2	49
3.5.2	Segunda Etapa	51
3.5.2.1	Fase 1	52
3.5.2.2	Fase 2	53
3.5.3	Restrições do Método	55
3.5.3.1	Tamanho Igual de Imagens	55
3.5.3.2	Tamanho Igual das Malhas	56
3.5.3.3	Curvas Delimitantes Externas Indeformáveis	56
3.5.3.4	Cruzamento de Curvas	57
3.5.3.5	Menor Distância entre Duas Curvas	58
3.6	Resultados Obtidos	61
3.7	Método dos Campos de Influência	64
3.7.1	<i>Morphing</i> com Um Par de Vetores	67
3.7.2	<i>Morphing</i> com Múltiplos Pares de Vetores	71

3.7.3	Restrições do Método	74
3.7.3.1	Tamanho Igual de Imagens	74
3.7.3.2	Número Igual de Vetores	75
3.7.3.3	Cruzamento de Vetores	75
3.7.3.4	Deslocamentos Irregulares	77
3.7.4	Resultados Obtidos	78
3.8	Resumo	82
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4.1	Introdução	84
4.2	Análise do Método das Malhas	85
4.2.1	Análise do Tempo de Processamento	85
4.2.2	Análise do Consumo de Memória	92
4.2.3	Análise da Determinação de Correspondências	95
4.3	Análise do Método dos Campos de Influência	96
4.3.1	Análise do Tempo de Processamento	96
4.3.2	Análise do Consumo de Memória	102
4.3.3	Análise da Determinação de Correspondências	104
4.3.4	Análise Comparativa entre os Métodos	105
4.4	Resumo	106
5	CONCLUSÕES	108
5.1	Futuras Extensões	109
5.1.1	<i>Morphing</i> entre Imagens em Movimento	111
5.1.2	Controle de Velocidade	112

5.1.3	Grupos de Primitivas	113
5.1.4	Paralelização e Vetorização dos Algoritmos	114
	BIBLIOGRAFIA	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Efeito de metamorfose entre imagens	18
Figura 2.1	Canais de imagens	24
Figura 2.2	Mapeamento direto [WOL90]	26
Figura 2.3	Mapeamento inverso [WOL90]	28
Figura 2.4	Filtragem de imagens [WOL90]	33
Figura 2.5	Processo de reamostragem	35
Figura 2.6	Ampliação e redução de imagens	35
Figura 2.7	Polinômios interpoladores cúbicos	37
Figura 2.8	Algoritmos <i>scanline</i>	38
Figura 2.9	Sistema para processamento de imagens	40
Figura 3.1	Deformação de imagens	42
Figura 3.2	Interpolação cromática linear	43
Figura 3.3	Interpolação de imagens <i>Morphing</i>	44
Figura 3.4	<i>Morphing</i> entre duas faces	46
Figura 3.5	<i>Morphing</i> entre duas imagens	46
Figura 3.6	Malhas de correspondência entre duas faces	47
Figura 3.7	Malhas de correspondência entre duas imagens	47
Figura 3.8	Sobreposição de imagens e malhas(faces)	48
Figura 3.9	Sobreposição de imagens e malhas	48
Figura 3.10	Malha intermediária (50% de deformação horizontal)	50
Figura 3.11	Variação das dimensões das regiões semelhantes	51
Figura 3.12	Deformação horizontal de um tabuleiro de xadrez (1ª etapa)	52
Figura 3.13	Malha intermediária (50% de deformação vertical)	53

Figura 3.14	Deformação completa de um tabuleiro de xadrez (2ª etapa) . . .	54
Figura 3.15	Direções permitidas para deslocamentos	57
Figura 3.16	Cruzamento de curvas das malhas	58
Figura 3.17	Vetores tangentes a uma curva	59
Figura 3.18	Menor distância entre duas curvas	60
Figura 3.19	Seqüência de deformação de uma imagem	62
Figura 3.20	Seqüência de <i>morphing</i> entre duas faces	63
Figura 3.21	Seqüência de <i>morphing</i> entre duas imagens	65
Figura 3.22	Vetores de influência	66
Figura 3.23	Sobreposição de imagens e vetores	66
Figura 3.24	Interpolação linear dos pontos de um vetor	67
Figura 3.25	Interpolação do centro, direção e tamanho de um vetor	68
Figura 3.26	Utilização de um par de vetores	68
Figura 3.27	Projeção do vetor $(\vec{P} - \vec{P}_1)$ sobre $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$	69
Figura 3.28	Recorte de imagem	70
Figura 3.29	Operação de escala não uniforme	71
Figura 3.30	Múltiplos pares de vetores	72
Figura 3.31	Cruzamento de vetores	76
Figura 3.32	Ocorrência de “fantasmas” [BEI92]	77
Figura 3.33	Eliminação de fantasmas por operação de escala [BEI92]	78
Figura 3.34	Eliminação de fantasmas por inclusão de vetor [BEI92]	78
Figura 3.35	Seqüência de deformação de uma imagem	80
Figura 3.36	Seqüência de <i>morphing</i> entre duas imagens	81
Figura 3.37	Representação conceitual para o Método das Malhas	82

Figura 3.38	Representação conceitual para o Método dos Campos de Influência	83
Figura 4.1	Variação resolução x malha x tempo de processamento	86
Figura 4.2	Variação resolução x tempo de processamento	87
Figura 4.3	Variação bilogarítmica resolução x tempo de processamento . .	87
Figura 4.4	Variação malha x tempo de processamento	89
Figura 4.5	Variação bilogarítmica malha x tempo de processamento	90
Figura 4.6	Variação resolução x tempo de processamento	91
Figura 4.7	Variação malha x tempo de processamento	92
Figura 4.8	Variação resolução x vetores x tempo de processamento	97
Figura 4.9	Variação resolução x tempo de processamento	98
Figura 4.10	Variação bilogarítmica resolução x tempo de processamento . .	98
Figura 4.11	Variação vetores x tempo de processamento	99
Figura 4.12	Variação bilogarítmica vetores x tempo de processamento	100
Figura 4.13	Comparação entre os métodos de <i>Morphing</i>	106
Figura 5.1	Edição de imagens	110
Figura 5.2	<i>Morphing</i> estático e em movimento	112
Figura 5.3	Controle de velocidades	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Tempo de processamento para deformação de imagens	61
Tabela 3.2	Tempo de processamento para <i>morphing</i> entre faces	64
Tabela 3.3	Tempo de processamento para <i>morphing</i> entre imagens	64
Tabela 3.4	Tempo de processamento para deformação de imagens	79
Tabela 3.5	Tempo de processamento para <i>morphing</i> de imagens	79
Tabela 4.1	Variação do tempo de processamento para deformação de imagens	86
Tabela 4.2	Variação do tempo de processamento para <i>morphing</i> de imagens	90
Tabela 4.3	Tempo utilizado para determinação de correspondências	95
Tabela 4.4	Variação do tempo de processamento para deformação de imagens	96
Tabela 4.5	Variação do tempo de processamento para <i>morphing</i> de imagens	101
Tabela 4.6	Tempo utilizado para determinação de correspondências	104

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre métodos utilizados para realizar metamorfose entre imagens digitais.

Segundo esses métodos é possível estabelecer uma imagem fonte, uma destino e, através de operações de mapeamento de texturas, realizar uma seqüência de imagens intermediárias. Essas imagens intermediárias apresentam-se como deformações sobre a imagem fonte ou como etapas de transição entre as imagens originais, efeito produzido pela inserção de um processo de fusão de imagens.

O processo de deformação varia segundo o método empregado e influencia diretamente nos resultados por ele gerado. Assim, dois métodos com características diferentes para deformação de imagens foram escolhidos, dentre os encontrados, para um estudo mais aprofundado e são referenciados como o Método das Malhas e o Método dos Campos de Influência.

Esses métodos são apresentados, seus funcionamentos discutidos e resultados gerados para se estabelecer uma análise entre os mesmos.

A análise é efetuada segundo os aspectos de tempo de processamento, consumo de memória e atribuição de correspondências entre as imagens, sendo que esta última característica leva em consideração o tempo total gasto para se estabelecer as correspondências necessárias entre a imagem fonte e a destino. Neste ponto também é estabelecido um quadro comparativo entre os métodos escolhidos, destacando-se vantagens e desvantagens.

Os resultados da aplicação dos métodos analisados encontram-se distribuídos ao longo do texto sob a forma de imagens e tabelas, são utilizados para provar a eficiência desses métodos e foram gerados por um sistema de testes implementado.

O sistema de testes desenvolvido possibilita a geração de imagens, segundo o método escolhido, informa os tempos utilizados no processamento e exibe essas imagens seqüencialmente sob a forma de uma animação.

Por fim o trabalho apresenta conclusões sobre o estudo, salientando aspectos considerados relevantes quando do estudo e implementação dos métodos, e indica futuras extensões que podem ser efetuadas a fim de tornar o sistema de testes mais flexível e completo.

PALAVRAS-CHAVE: Interpolação de Imagens, Metamorfose, Deformação

TITLE: "THE STUDY AND ANALYSIS OF BIDIMENSIONAL IMAGES INTERPOLATION METHODS"

ABSTRACT

This work presents a study on methods used to make digital images metamorphosis.

According to these methods it is possible to establish a source image, a destination image and also to generate a sequence of intermediate images through operations of texture mapping. These intermediate images appears as deformations of the source image or as transition steps between the original images which are produced by the insertion of a cross-dissolve process.

The warping process varies according to the method which is used and it influences directly its results. Thus, two methods for image warping with different characteristics were chosen, among the available ones, for a more detailed study and are refered as the Mesh Method and as the Fields of Influence Method.

These two methods are presented, their functioning is discussed and results are generated to allow comparative analyses.

The analysis concerns aspects of processing time, memory allocation and correspondence establishment, which take into account the time waisted in order to establish the correspondences between the images. At this point it is also established a comparative table between the chosen methods highlighting advantages and disadvantages.

The results of the application of the analysed methods are distributed throughout the text as images and tables, which are used to prove the efficiency of them and were generated by a test system implemented.

The system developed provides the generation of images, according to the chosen method, informs the time wasted on processing and shows those images sequentially as an animation.

Finally this work presents conclusions about the study and indicates future extensions that can be done in order to make the developed system more flexible and complete.

KEYWORDS: Image Interpolation, Morphing, Warping

1 INTRODUÇÃO

A utilização de Computação Gráfica na produção de efeitos especiais para a Indústria Cinematográfica vem crescendo consideravelmente em conjunto com o desenvolvimento dos computadores.

Produções que até bem poucos anos eram consideradas impossíveis de serem realizadas por animação tradicional estão surpreendendo até mesmo o setor de criação do ramo publicitário, mercado exigente com relação à qualidade.

Dentre as técnicas que somente eram utilizadas em desenhos animados e que com o uso de computadores pode ser empregada em filmes pode-se ressaltar a metamorfose.

Basicamente existem dois tipos principais de metamorfoses:

- Metamorfose entre Objetos Modelados e
- Metamorfose entre Imagens Digitais.

O primeiro tipo de metamorfose utiliza objetos modelados, por alguma técnica de modelagem geométrica, que se transformam em outros com características e atributos diferentes [WAL91], e é melhor abordada em Oliveira Neto [OLI91].

Já a Metamorfose entre Imagens Digitais é uma técnica de vídeo utilizada para realizar efeitos de transformação entre duas imagens previamente digitalizadas.

No princípio, essas transformações eram rudimentares devido à escassez de tecnologia e podem ser vistas em filmes de horror como “*The Wolfman*” (produção de 1941). Naquela época, a técnica foi atingida através de várias operações de fusão entre as imagens, enquanto o ator era maquiado. Porém, com o surgimento de computadores gráficos de alta velocidade, a técnica, que havia sido abandonada, foi

1.2 Motivação e Objetivos

O efeito produzido pela metamorfose entre imagens não consiste somente de uma simples interpolação cromática entre os pontos das imagens fonte e destino, mas envolve deslocamentos de regiões em ambas. Estes deslocamentos podem ocorrer de diversas formas, dependendo do método empregado, e merecem um estudo mais aprofundado, a fim de avaliar o desempenho e auxiliar sua compreensão.

Desta forma os três principais objetivos deste trabalho são:

- pesquisar os métodos existentes, bem como as estruturas utilizadas e seus funcionamentos,
- implementar um sistema de testes, a fim de gerar resultados para análise dos métodos escolhidos, e
- analisar os resultados obtidos pelo sistema, destacando o desempenho dos métodos e salientando as suas vantagens e desvantagens.

A escolha dos métodos implementados teve por base diferenças nos princípios de funcionamento destes como exposto no capítulo 3.

1.3 Estrutura da Dissertação

Com a finalidade de apresentar o estudo de forma evolutiva, os demais capítulos deste trabalho apresentam-se organizados da seguinte forma.

No capítulo 2, serão abordados conceitos básicos de processamento de imagens, para que certas operações citadas ao longo do trabalho sejam compreendidas sem maiores dificuldades.

No capítulo 3, são apresentados os métodos de *Morphing* encontrados, bem como são discutidos os procedimentos envolvidos nos cálculos das imagens geradas pelos métodos escolhidos para análise. Ainda no capítulo 3 é feita a justificativa da escolha dos métodos e resultados obtidos, através da implementação elaborada, são introduzidos.

No capítulo 4, é realizada a análise desses resultados e são traçados gráficos e comparações entre os métodos, salientando vantagens e desvantagens, bem como os desempenhos do ponto de vista de processamento, memória e usuário.

O capítulo 5 conclui o trabalho apresentando aspectos considerados relevantes quando do desenvolvimento deste, assim como do desenvolvimento do *software* de teste, e sugere possíveis extensões.

2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

2.1 Introdução

Este capítulo revisa alguns conceitos básicos de processamento de imagens aplicados aos Métodos de *Morphing* que são apresentados no capítulo 3.

Para tanto, ele aborda o conceito de imagens, seus componentes e as transformações que alteram seus aspectos, pois as transformações de metamorfose, como serão vistas, baseiam-se prioritariamente em operações de deformação de imagens.

Essas deformações podem ocorrer de várias maneiras, porém, apenas as transformações relevantes aos métodos estudados são apresentadas.

2.2 Sinais e Imagens

Sinais são funções que podem representar imagens. No caso de processamento de imagens, são funções de duas variáveis:

$$f(x, y)$$

onde a função $f(x, y)$ representa a luminosidade do ponto (x, y) em um sistema de coordenadas espaciais, visto em Wolberg [WOL90].

As imagens são classificadas pela sua existência ou não, sobre todos os pontos do domínio espacial e pela precisão com que são representadas. Podendo, para este item, se enquadrar em

- imagens de precisão finita e
- imagens de precisão infinita.

Com relação à classificação quanto ao domínio, as denominações

- imagem contínua e
- imagem discreta

são empregadas a fim de simplificar a nomenclatura. Portanto, as seguintes categorias para domínio espacial e precisão se originam:

- imagem contínua - contínua,
- imagem contínua - discreta,
- imagem discreta - contínua e
- imagem discreta - discreta.

Uma imagem é dita pertencer à classificação **contínua - contínua** se a sua precisão for infinita e ela estiver em um conjunto contínuo de posições espaciais. Estas imagens também são conhecidas como imagens **analógicas** ou simplesmente **contínuas**, e quando possuem precisão finita (conjunto de valores representáveis computacionalmente) geram as imagens **contínuas - discretas**.

Alternativamente, as imagens podem possuir uma precisão infinita, porém atribuída em um conjunto discreto de posições de amostragem, resultando nas imagens **discreta - contínua**.

Essas imagens quando quantificadas para serem tratadas por computadores classificam-se no quarto grupo citado **discreta - discreta**. Desta forma, imagens **digitais** ou simplesmente **discretas** são imagens transformadas da sua forma contínua para a precisão numérica do computador que irá manipulá-la.

Os métodos empregados para transformar as imagens de analógicas para digitais fogem ao escopo deste trabalho e podem ser encontrados em Nagy [NAG83], Schreiber [SCH86] e Wolberg [WOL90].

Quando a função $f(x, y)$ retorna um valor único, a imagem é uma representação monocromática, ou em tons de cinza, da imagem real e seu valor indica a luminosidade do ponto (x, y) . Porém, se a função f especificar múltiplos componentes de cor para cada ponto (x, y) do espaço de coordenadas, a imagem é cromática ou colorida.

Embora existam várias formas para representação da cor, as imagens coloridas são geralmente definidas em termos das três componentes básicas: Vermelho(*Red*), Verde(*Green*) e Azul(*Blue*)¹.

A representação dessas funções é dada por

$$f(x, y) = \{f_{red}(x, y), f_{green}(x, y), f_{blue}(x, y)\}.$$

As funções compostas podem ser vistas como uma pilha de imagens compostas por funções de um único valor, chamadas canais. Assim, imagens monocromáticas possuem um único canal, enquanto que as coloridas possuem três canais (RGB).

O conceito de canais pode ser melhor entendido pela figura 2.1.

As imagens coloridas são compostas por três canais (RGB) do espectro visível da luz e as monocromáticas representam uma média entre essas componentes, o que tornou necessária uma breve introdução ao assunto.

Maiores informações sobre este tema podem ser encontradas em Porter [POR84].

¹As imagens coloridas tratadas ao longo deste trabalho serão referenciadas pela sigla RGB.

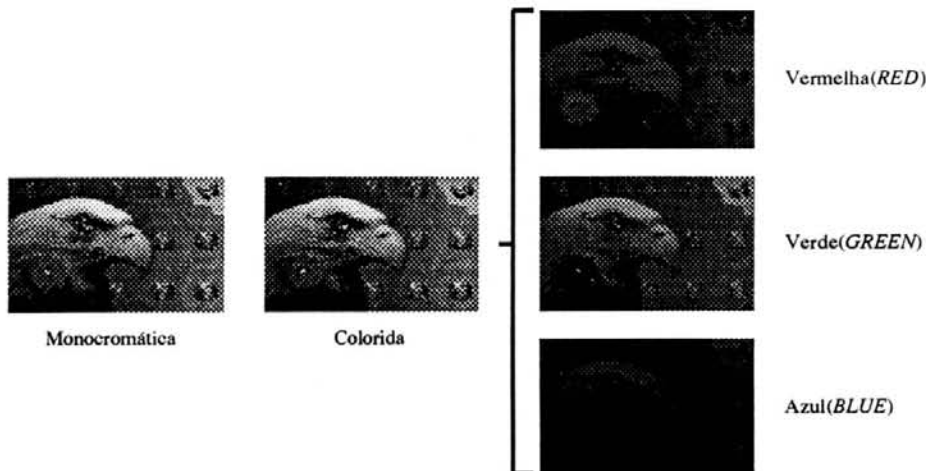


Figura 2.1: Canais de imagens

2.3 Transformações Espaciais

Transformações espaciais são funções que estabelecem uma correspondência espacial entre todos os pontos de uma imagem fonte e uma destino e, portanto, a base para as operações de processamento de imagens.

As deformações em imagens são geradas, na maioria dos casos, por funções polinomiais, gerando a necessidade de uma estimativa correta de seus coeficientes.

Não é finalidade deste trabalho esgotar o assunto, assim, serão apresentadas apenas as funções empregadas nos métodos implementados.

No primeiro método de interpolação de imagens analisado, a imagem fonte é mapeada na imagem destino através de um conjunto de regiões delimitadas por uma malha de polinômios do terceiro grau. Já para o segundo método, a imagem destino é mapeada na imagem fonte valendo-se de vetores de influência.

Essas duas categorias de mapeamento possuem características distintas e merecem uma maior abordagem.

2.3.1 Definições

Uma transformação espacial define uma relação geométrica entre cada ponto das imagens fonte e destino.

Uma imagem fonte consiste de pontos de referência cujos valores de coordenadas são conhecidos. Por outro lado, a imagem destino é composta pelos dados da imagem fonte após sofrerem uma deformação qualquer.

As funções de mapeamento, em uma formulação genérica, podem ocorrer de duas formas: a primeira relacionando os pontos de saída aos de entrada e a segunda realizando a operação inversa.

Suas representações podem ser dadas por

$$[x, y] = [X(u, v), Y(u, v)]$$

ou

$$[u, v] = [U(x, y), V(x, y)]$$

onde $[u, v]$ referem-se ao sistema de coordenadas da imagem fonte correspondente ao ponto de saída $[x, y]$, e X, Y, U e V são funções de mapeamento arbitrárias que especificam transformações espaciais únicas.

Uma vez que X e Y mapeiam a entrada na saída, elas são denominadas **funções de mapeamento direto**. Enquanto U e V são chamadas de **funções de mapeamento inverso**, porque realizam o mapeamento da imagem de saída na imagem de entrada.

2.3.2 Mapeamento Direto

O mapeamento direto consiste em estabelecer uma relação para cada pixel da imagem de entrada na imagem de saída. Esta relação é estabelecida através das funções X e Y .

Essas funções transformam um conjunto de coordenadas inteiras em coordenadas reais, que por sua vez devem ser discretizadas em coordenadas inteiras na imagem de saída.

Tal transformação pode ser representada pela figura 2.2, onde o conjunto discreto de entrada [A..G] é transformado dando origem ao conjunto também discreto de saída [A'..G'].

Um dos problemas do mapeamento direto é que, ao se discretizar as coordenadas contínuas, fornecidas pelas funções X e Y , os problemas de

- buracos e
- sobreposições

se originam.

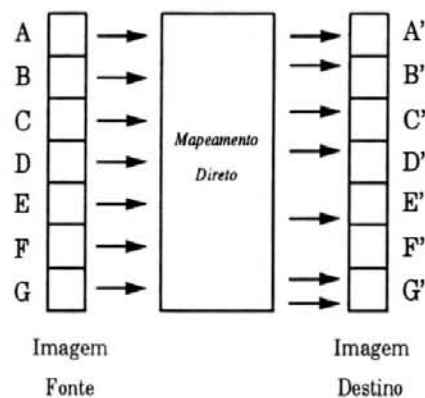


Figura 2.2: Mapeamento direto [WOL90]

Buracos são lugares onde os *pixels*² são indefinidos, isto é, ao se realizar a transformação espacial não foram geradas coordenadas para determinadas regiões da imagem de saída.

Já sobreposições ocorrem quando, para uma determinada região da imagem de saída, várias entradas transformadas são atribuídas.

Na figura 2.2, o ponto F' será representado por um buraco, enquanto que em G' ocorrerá uma sobreposição. Para ambos os casos, a solução empregada é a utilização de acumuladores que calcularão a influência dos *pixels* de entrada nos de saída.

Nas sobreposições, o valor final atribuído será uma média dos valores individuais computados, enquanto que no caso de buracos, eles serão preenchidos com uma interpolação cromática entre os valores das cores dos *pixels* que os delimitam.

Para maiores informações neste tópico, vide Heckbert [HEC86].

2.3.3 Mapeamento Inverso

Este mapeamento possui uma relação direta com o tamanho da imagem de saída, uma vez que projeta cada coordenada destino na imagem fonte. Esta projeção é efetuada pela utilização das funções U e V .

Para este método não é necessário acumulador e os pontos localizados fora da janela de visualização não necessitam ser calculados. Portanto, tornou-se o método mais empregado em processamento de imagens.

²A partir deste capítulo os pontos das imagens também poderão ser referenciados por *pixel* contração das palavras *picture element*

Através da figura 2.3 pode-se ter uma representação de como o processo é realizado. O conjunto discreto de saída $[A'..G']$ é transformado, segundo as funções de mapeamento inverso, e é amostrado no conjunto, também discreto, $[A..G]$.

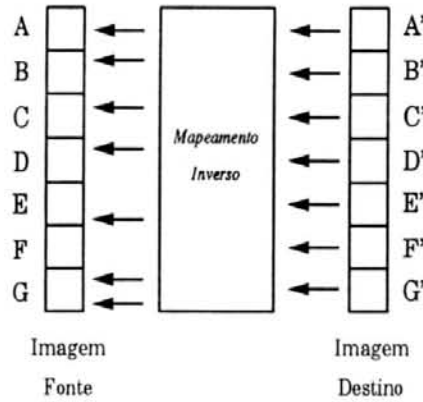


Figura 2.3: Mapeamento inverso [WOL90]

Como para o mapeamento direto, as funções U e V mapeiam um conjunto de coordenadas inteiras em valores reais, que serão posteriormente amostrados em um conjunto de coordenadas também inteiras. Mas se diferenciam no cálculo dos pontos denominados indefinidos.

Se uma grande quantidade de pontos de entrada for ignorada, a imagem de saída poderá perder detalhes, os quais em certos casos são de grande importância.

Esse problema pode ser resolvido com a inserção de uma etapa de filtragem, sendo que esta é mais conveniente no caso de mapeamento inverso do que para o mapeamento direto, pois tem a vantagem de ocorrer no espaço da imagem fonte.

No mapeamento inverso, todos os pontos da imagem de saída são garantidamente calculados, o que não ocorre no processo de mapeamento direto. Esta, em conjunto com a ausência de acumulador, são as grandes vantagens desse método.

Seu uso é recomendado quando a imagem de saída for calculada seqüencialmente, as funções U e V forem conhecidas e a imagem de entrada estiver armazenada em memória como mencionado, *apud* Wolberg [WOL90], em Dippe[DIP85], Heckbert [HEC89] e Mitchell [MIT87].

2.4 Transformações Afins

Transformações espaciais simples podem ser expressas em termos de uma matriz de transformação genérica T aplicada sobre o ponto genérico $[u, v, w]$. Esta matriz é responsável pelas operações de escala, deformação, rotação, reflexão, translação e perspectiva e pode ser denotada por

$$[x', y', w'] = [u, v, w]T$$

onde

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}.$$

Os elementos da submatriz

$$T_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

realizam as operações de escala, deformação e rotação. A matriz $\begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \end{bmatrix}$ produz translação e a matriz $\begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix}$ é responsável pelas operações de perspectiva.

O elemento a_{33} proporciona uma operação de escala global.

A matriz T_2 possui a característica de ao ser aplicada sobre os pontos de uma imagem não produzir translações, sendo estas muitas vezes necessárias.

Para solucionar este problema foram introduzidas as transformações afins. Essas transformações ($A(x)$) garantem que existe uma constante “ t ” que ao ser adicionada a uma transformação linear ($L(x)$) qualquer, realiza uma translação para todos os pontos do domínio espacial.

$$A(x) = L(x) + t.$$

Portanto, as transformações lineares são um subconjunto das transformações afins.

Visando proporcionar uma matriz que acomodasse as operações de translação fez-se necessário o acréscimo de um componente ao vetor $[x, y]$, dando origem ao vetor $[x, y, 1]$, à matriz

$$T_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix}$$

e à transformação afim genérica

$$[x, y, 1] = [u, v, 1] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix}.$$

Os elementos $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ foram adicionados à matriz T_3 para que sua inversa pudesse ser calculada. A matriz inversa é necessária porque estabelece uma relação bidirecional entre os sistemas de coordenadas das imagens fonte e destino.

Desta forma, um mapeamento afim se caracteriza por uma transformação matricial, na qual a última coluna da matriz possui os elementos $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

2.4.1 Transformações Compostas

Muitas vezes, as transformações afins aparecem combinadas em uma matriz de transformação única que reúne as propriedades de suas componentes. Assim, uma só matriz pode realizar as operações de translação, rotação e escala, minimizando o tempo de processamento.

Como exemplo pode-se citar a matriz resultante das operações descritas no parágrafo anterior

$$\begin{aligned}
 T_{comp} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_u & T_v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_u & 0 & 0 \\ 0 & S_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} S_u \cos\alpha & S_v \sin\alpha & 0 \\ -S_u \sin\alpha & S_v \cos\alpha & 0 \\ S_u(T_u \cos\alpha - T_v \sin\alpha) & S_v(T_u \sin\alpha + T_v \cos\alpha) & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Uma maior abordagem sobre este assunto pode ser encontrada em Mortenson [MOR85] e Foley [FOL90].

2.5 Teoria da Amostragem

As transformações espaciais especificam transformações geométricas dentro de um domínio contínuo. Porém, quando este domínio é discretizado, problemas podem ocorrer.

O processo através do qual um domínio contínuo é discretizado, de tal forma a representar o domínio original, denomina-se amostragem.

Assim, os problemas mencionados tem origem no método empregado para amostragem das imagens contínuas, a fim de que elas possam ser utilizadas em um sistema computacional ³.

A Teoria da Amostragem estabelece fundamentos para a análise de sinais amostrados através de uma formulação matemática que descreve relações entre um sinal contínuo e suas amostragens.

Ela é utilizada para solucionar os problemas de

- reconstrução de imagens e
- filtragem

estabelecendo limites teóricos que especificam se a reconstrução é passível de ser efetuada.

Por reconstrução, entende-se o processo pelo qual a imagem **contínua** original $f(x)$ pode ser recomposta utilizando-se a imagem amostrada $f_{amost}(x)$ e, por filtragem, os processos utilizados para melhorar ou alterar as características de uma imagem.

³Como visto em 2.2 as imagens digitais são definidas em um domínio discreto

A figura 2.4 apresenta uma imagem sobre a qual foi aplicado um processo de filtragem a fim de exemplificar o ganho na qualidade e a importância de uma boa amostragem.

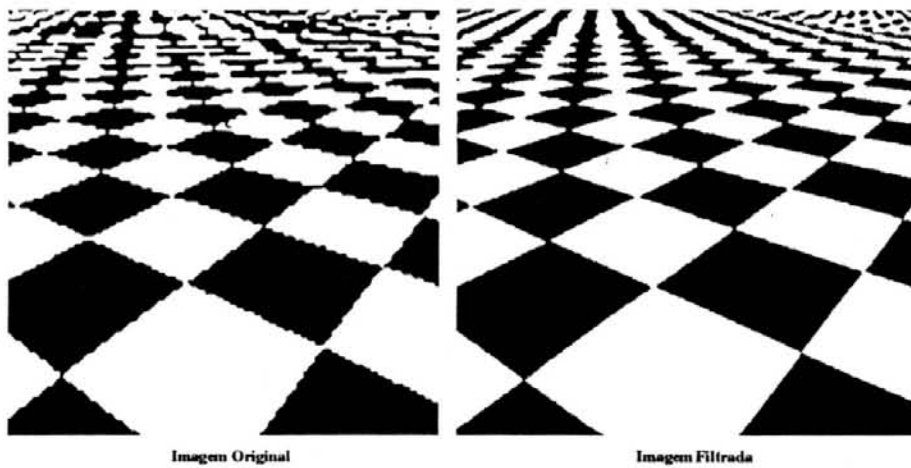


Figura 2.4: Filtragem de imagens [WOL90]

Valerie Hall [HAL92] em seu trabalho *Introduction to Morphing* apresenta certas condições necessárias para que a etapa de reconstrução possa ser realizada, bem como referências bibliográficas sobre o assunto.

2.6 Reamostragem de Imagens

A reamostragem de imagens é o processo de transformação de um sistema de coordenadas em outro através da utilização das transformações espaciais.

Exemplificando o processo de reamostragem para o caso de mapeamento inverso a imagem de saída é calculada através dos seguintes passos

- a imagem de saída é mapeada, com a utilização da função de mapeamento, na imagem de entrada,
- o resultado da etapa anterior é uma grade de reamostragem que especifica os locais onde a imagem de entrada deve ser reamostrada e

- a imagem de entrada é reamostrada nas posições calculadas e os valores encontrados são atribuídos aos *pixels* de saída correspondentes.

O processo descrito acima gera uma grade definida em um domínio contínuo que deve ser aplicada em um domínio discreto, isto torna imprescindível a utilização de uma etapa de reconstrução.

Na reconstrução, a imagem de entrada é convertida para seu domínio original (contínuo) e, portanto, pode ser amostrada em qualquer posição determinada pela grade calculada.

Do processo descrito duas etapas podem ser identificadas:

- reconstrução de imagem e
- amostragem

as quais originaram o nome **reamostragem**.

Através da figura 2.5 a etapa de reamostragem pode ser melhor compreendida. Nela a imagem fonte é reconstruída para seu domínio contínuo e este pode ser amostrado nas posições determinadas pela grade de reamostragem, resultante da aplicação da função de mapeamento sobre os pontos da imagem destino.

Como exemplo de reamostragem pode-se citar as operações de ampliação e redução mostradas na figura 2.6

No exemplo demonstrado pela figura 2.6 foi efetuada uma interpolação linear entre os *pixels*, gerando cores intermediárias entre as cores dos pontos extremos.

Essa interpolação, porém, pode ocorrer de várias formas, de acordo com o processo empregado. A seguir serão apresentadas as interpolações utilizadas nos Métodos de *Morphing* estudados.

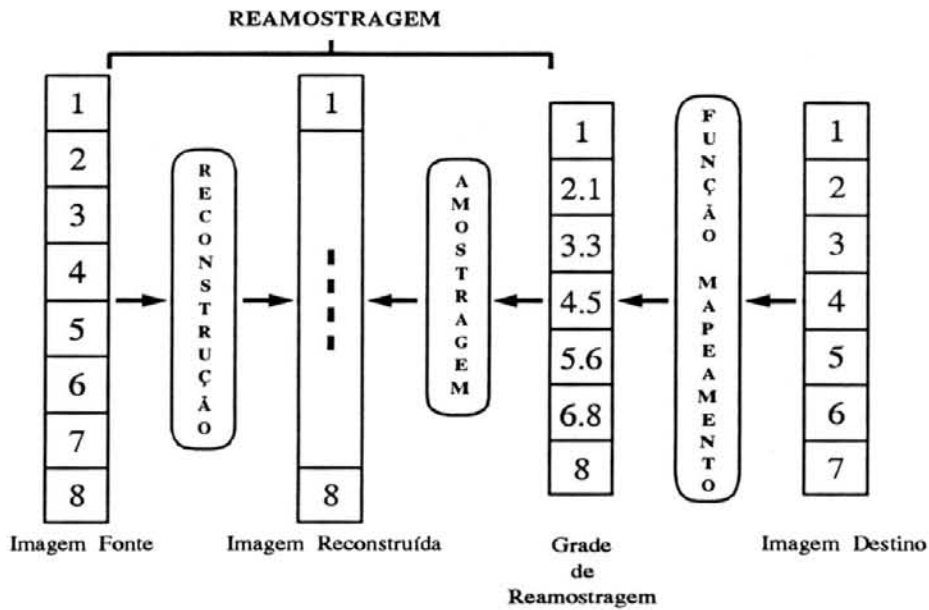


Figura 2.5: Processo de reamostragem

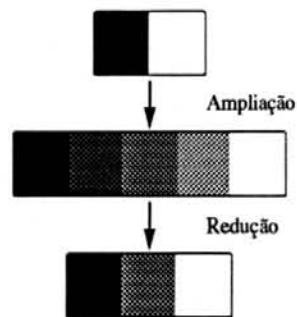


Figura 2.6: Ampliação e redução de imagens

2.6.1 Interpolação Linear

Este método de interpolação traça um segmento de reta entre cada conjunto formado por dois *pixels* consecutivos de entrada.

Sendo um intervalo $[x_0, x_1]$ e os valores f_0 e f_1 para os pontos extremos da função $f(x)$, obtém-se o polinômio interpolador

$$f(x) = a_1x + a_0$$

onde a_0 e a_1 são determinados pela resolução do sistema

$$\begin{bmatrix} f_0 & f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & x_1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

A resolução de 2.1 dá origem à equação do segmento de reta que une os pontos (x_0, f_0) e (x_1, f_1) , a qual foi utilizada para realizar as operações de ampliação e redução da figura 2.6.

Em sua forma genérica a equação do segmento de reta é dada por

$$f(x) = f_0 + \left[\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right] (f_1 - f_0).$$

2.6.2 Interpolação Cúbica

A interpolação cúbica baseia-se em uma composição de polinômios contínuos do terceiro grau, ou simplesmente, *splines* cúbicos.

Dado um conjunto de pontos (x_k, y_k) para $0 \leq k < n$, o interpolador *spline* cúbico consiste de $n - 1$ polinômios cúbicos. Esses polinômios passam pelos n pontos dados, que são denominados pontos de controle.

Os polinômios interpoladores cúbicos $f(x)$ devem

- passar através de dois pontos de controle consecutivos definidos no intervalo $[x_k, x_{k+1}]$ e
- possuir continuidade de posição (f_k), tangente (f'_k) e curvatura (f''_k) para os pontos x_k do intervalo $1 \leq k \leq n - 2$.

De uma forma genérica os polinômios interpoladores podem ser dados por

$$f(x) = a_3(x - x_k)^3 + a_2(x - x_k)^2 + a_1(x - x_k) + a_0 \quad (2.2)$$

e representados visualmente através da figura 2.7.

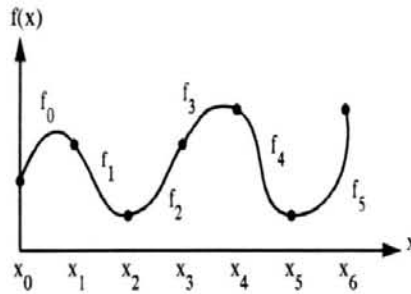


Figura 2.7: Polinômios interpoladores cúbicos

No caso de interpolações cúbicas, as contribuições dos *pixels* da imagem fonte na imagem destino são dadas através de funções como a da equação 2.2 e estudadas em maior profundidade em Wolberg [WOL90], Kochanek *et. al.* [KOC84] e Andrews [AND76].

2.7 Algoritmos de Linha de Varredura

A necessidade de algoritmos rápidos para operações de deformação de imagens fez com que uma grande quantidade de trabalhos fossem direcionados para essa área.

Com a utilização de algoritmos de linha de varredura, ou algoritmos *scanline*, a complexidade e o tempo de processamento das aplicações que envolvem

transformações de imagens foram significativamente reduzidas, fazendo com que eles fossem largamente empregados.

Esses algoritmos baseiam-se na separação das transformações geométricas, *i.e.*, eles separam os problemas bidimensionais em um conjunto de problemas unidimensionais, o que permite sua fácil implementação em *hardware* convencional ou, para um melhor desempenho, em *hardware* vetorial.

Os algoritmos *scanline* não são passíveis de utilização em todas as funções de mapeamento existentes, porém podem ser empregados em uma larga classe de transformações, dentre as quais situam-se as transformações afins. Essas transformações são abordadas na seção 2.4.

A separação das imagens bidimensionais em imagens vetoriais é melhor compreendida com o auxílio da figura 2.8. Nela a imagem 2-D é dividida em vários vetores horizontais e verticais, portanto 1-D, que são processados individualmente, facilitando o processo de cálculo.

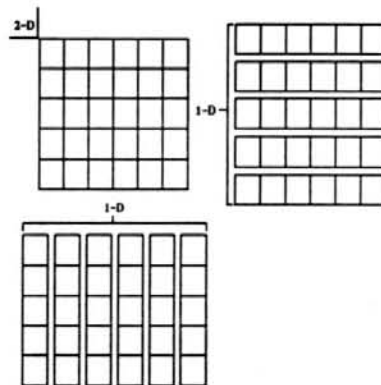


Figura 2.8: Algoritmos *scanline*

2.7.1 Mapeamento Vetorial

Ao separar os problemas 2-D em uma série de problemas 1-D três vantagens principais surgem:

- a reamostragem torna-se mais simples, uma vez que a reconstrução e a amostragem podem ser efetuadas em um espaço unidimensional,
- não há a necessidade de algoritmos de filtro que trabalhem em 2-D, pois o processamento ocorre sobre os vetores, que são primitivas 1-D, e
- o mapeamento pode ser feito em ordem *scanline* tanto na amostragem da imagem fonte quanto na geração da imagem destino.

Devido à natureza dos dados, essa técnica pode ser facilmente empregada em *hardware pipeline*, pois os dados consistem de vetores sobre os quais serão aplicadas as mesmas operações que são independentes entre si.

2.8 Resumo

Este capítulo apresentou uma revisão de alguns conceitos básicos de processamento de imagens que serão empregados ao se descrever os Métodos de *Morphing* estudados.

Desta forma os conceitos de

- Sinais e Imagens,
- Transformações Espaciais,
- Teoria de Amostragem,
- Reamostragem de Imagens e
- Algoritmos *Scanline*

foram apresentados e são utilizados para descrever o sistema de testes implementado, representado pela figura 2.9.

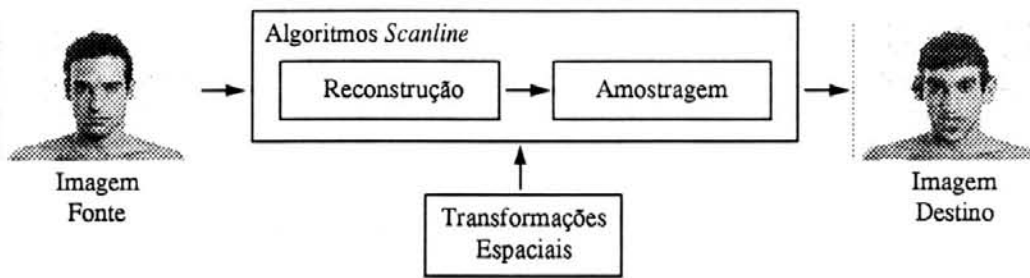


Figura 2.9: Sistema para processamento de imagens

Nos capítulos seguintes, os conceitos abordados serão apenas citados, portanto, a compreensão dos mesmos se faz necessária.

3 METAMORFOSE DIGITAL ENTRE IMAGENS *MORPHING*

3.1 Introdução

Este capítulo descreve os procedimentos envolvidos durante uma metamorfose entre imagens, bem como os dois métodos escolhidos para estudo.

Esses métodos realizam a operação de *Morphing* empregando diferentes

- transformações espaciais,
- determinação de regiões semelhantes e
- reamostragem

e, portanto, foram escolhidos para análise.

Também são apresentados resultados individuais referentes ao tipo de metamorfose empregada, sendo a análise dos mesmos vista no capítulo 4.

3.2 Deformação de Imagens

A deformação de imagens é a etapa básica de todo o processo de *Morphing* e baseia-se em processos de mapeamento de texturas vistos em Smith [SMI87], Oka *et al.* [OKA87] e Bennis *et al.* [BEN91].

Nessa etapa as imagens fonte e destino devem ser deformadas de forma que as características semelhantes das duas imagens coincidam.

Para que isso ocorra, certas regiões devem sofrer ampliações e outras reduções. Estas ampliações e reduções são alcançadas através das operações de reamostragem vistas em 2.6.

A deformação de imagens também é conhecida por *Digital Image Warping* e, nos métodos analisados, é efetuada através de algoritmos *scanline*, o que sob certas circunstâncias, explicadas no decorrer deste capítulo, gera transformações indesejáveis.

A figura 3.1 apresenta uma imagem que sofreu deformações e onde pode-se identificar as regiões em que elas ocorreram.



Figura 3.1: Deformação de imagens

3.3 Interpolação Cromática

Esta é a segunda etapa a ser efetuada sobre as imagens quando da elaboração de uma metamorfose.

A interpolação cromática, também conhecida como *cross-dissolve*, consiste em realizar uma variação entre as componentes RGB de todos os *pixels* das imagens fonte e destino após sofrerem as deformações necessárias.

As três componentes cromáticas podem variar segundo um método de interpolação qualquer, como os vistos nas seções 2.6.1 e 2.6.2.

No caso de uma interpolação linear essa variação pode ser dada como na figura 3.2. Nela observa-se que a componente Verde (*GREEN*) da cor varia linearmente no intervalo $[0;255]$, fazendo com que a cor, inicialmente vermelha ($RED = 255, GREEN = 0, BLUE = 0$), torne-se amarela ($RED = 255, GREEN = 255, BLUE = 0$).

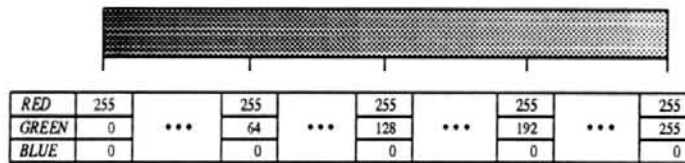


Figura 3.2: Interpolação cromática linear

Ao se realizar essa interpolação o efeito de transição, desejado para dar continuidade à metamorfose, é alcançado.

É nesta etapa que se determina a velocidade com que a imagem fonte irá se transformar na destino, pois é através dela que as imagens vão deixando de apresentar características da primeira e assumindo semelhança à segunda.

Para que a velocidade varie basta que o método de interpolação escolhido permita essa operação.

3.4 Interpolação de Imagens

Como foi visto é necessário que certas regiões das imagens sofram deformações. A finalidade deste processo é fazer com que características semelhantes de ambas as imagens coincidam.

Assim é necessário calcular uma imagem deformada da imagem fonte para a destino, bem como uma deformada da destino com relação a imagem fonte, para cada passo da metamorfose.

Ao se estabelecer as imagens deformadas, elas são interpoladas cromaticamente, conforme descrito na seção anterior.

Portanto, o processo de interpolação de imagens pode ser resumido através do diagrama representado pela figura 3.3.

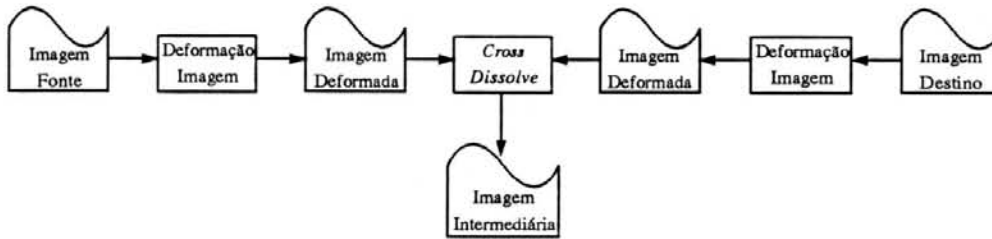


Figura 3.3: Interpolação de imagens *Morphing*

Existem vários métodos para se estabelecer as correspondências entre as imagens, a fim de transformá-las em uma seqüência de *Morphing*:

- Método dos Triângulos,
- Método das Malhas,
- Método dos Pontos,
- Método dos Campos de Influência e
- Método das Malhas Controladas pelos Campos de Influência,

porém dois métodos com características diferentes para

- transformação espacial,
- atribuição de correspondências e
- reamostragem

foram escolhidos para estudo.

Esses métodos são favoráveis para análise porque seus resultados visuais são semelhantes, mas a técnica empregada diverge. Eles são encontrados na literatura científica como

- Método das Malhas (*Mesh Method*) e
- Método dos Campos de Influência (*Fields of Influence Method*).

O primeiro foi desenvolvido por Douglas Smythe nos laboratórios da *Industrial Light and Magic* (ILM), divisão da empresa *Lucas Film* responsável pelos efeitos especiais do filme “Willow”. Neste filme ocorre a seguinte seqüência de *Morphing*

carneiro → avestruz → pavão → tartaruga → tigre → mulher.

Já o segundo método foi desenvolvido nos laboratórios da *Pacific Data Images* (PDI) e tem sido utilizado em larga escala em comerciais de televisão e em vídeos musicais como “*Black and White*” estrelado por Michael Jackson. Este *video clip* popularizou a técnica e apresenta uma seqüência de transformações faciais em movimento.

Nas próximas seções esses dois métodos serão apresentados e o processo através do qual realizam o efeito de metamorfose discutido.

3.5 Método das Malhas

Este método utiliza malhas formadas por polinômios do terceiro grau para estabelecer uma função de mapeamento entre as imagens fonte e destino.

A função de mapeamento especifica uma transformação espacial na qual regiões semelhantes entre as imagens serão processadas. Por regiões semelhantes entende-se porções das imagens com características correspondentes, ou regiões nas quais deseja-se obter o efeito de *Morphing*.

Como exemplo pode-se citar a metamorfose entre duas faces, vide figura 3.4, onde regiões como: olhos, nariz, boca, sobrancelhas devem ser delimitadas ou a metamorfose entre duas imagens, figura 3.5, onde um conjunto de pessoas deve ser mapeado na palavra “criação”.

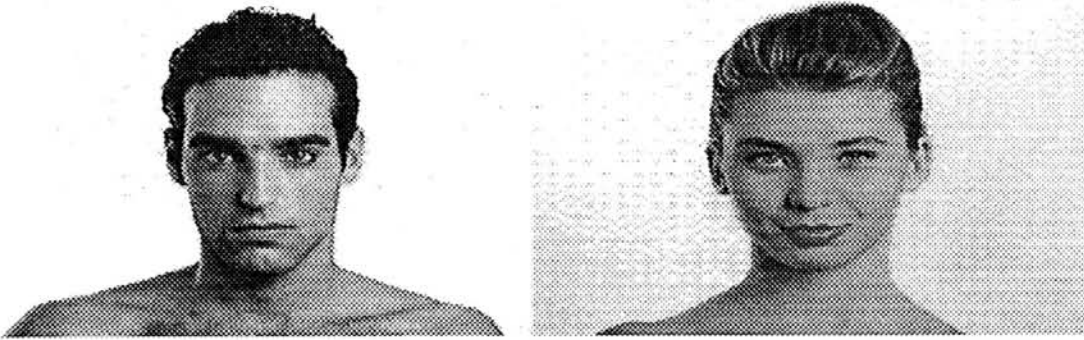


Figura 3.4: *Morphing* entre duas faces

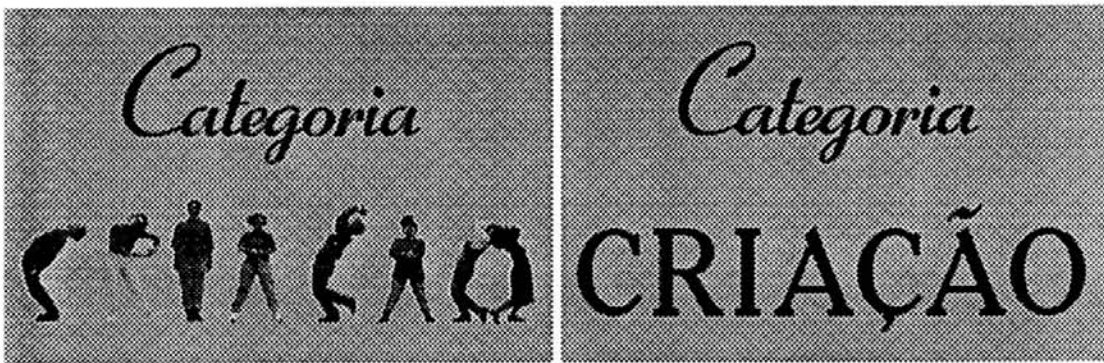


Figura 3.5: *Morphing* entre duas imagens

A malha que estabelece as correspondências entre as imagens é determinada pela alteração da posição dos pontos de controle dos polinômios formadores. Como visto em 2.6.2, os pontos de controle são responsáveis pela especificação da interpolação cúbica, portanto estabelecem o formato que a malha irá apresentar.

Na figura 3.6 pode-se identificar as malhas que estabelecem as correspondências para o exemplo da figura 3.4, enquanto que a figura 3.7 apresenta as malhas para a interpolação das imagens da figura 3.5.

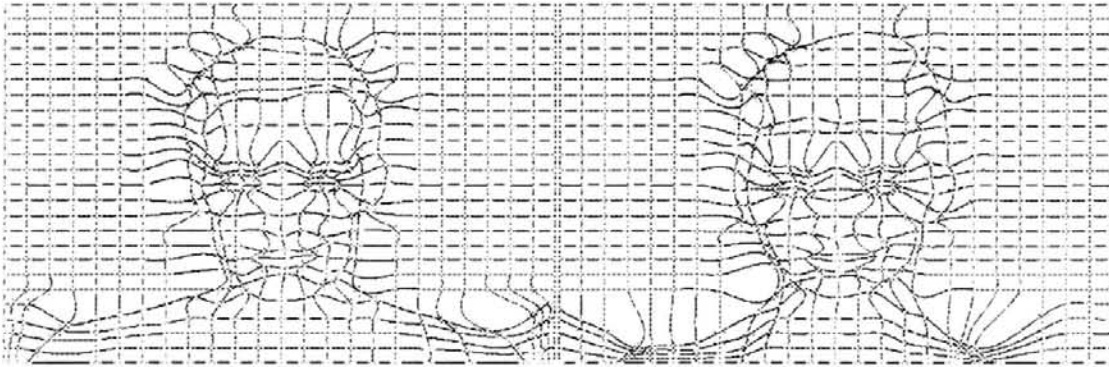


Figura 3.6: Malhas de correspondência entre duas faces

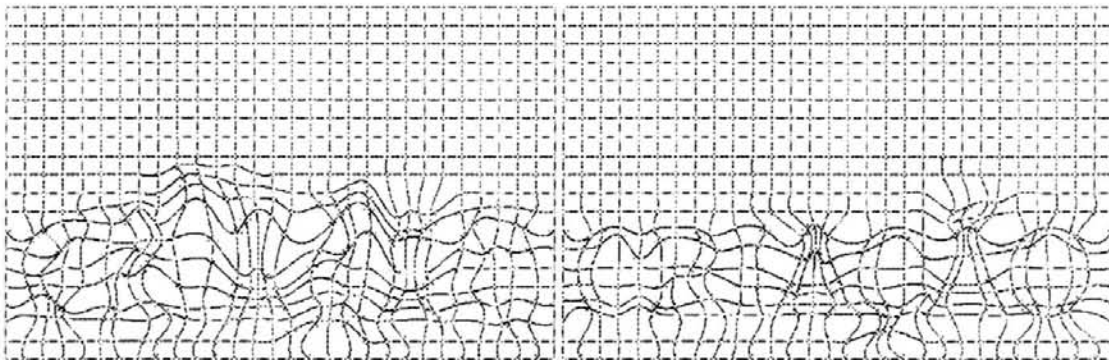


Figura 3.7: Malhas de correspondência entre duas imagens

Em ambas as figuras 3.6 e 3.7 nota-se a presença dos pontos de controle denotados por uma cruz “+” na intersecção dos polinômios horizontais e verticais.

Realizando a sobreposição das figuras 3.4 e 3.6 pode-se claramente notar as regiões semelhantes entre as imagens fonte e destino e obtém-se a figura 3.8.

Do mesmo modo para as figuras 3.5 e 3.7 identificam-se as correspondências entre as imagens e obtém-se a figura 3.9.

Quando o processo de demarcação acaba, o método de *Morphing* começa seu processamento.

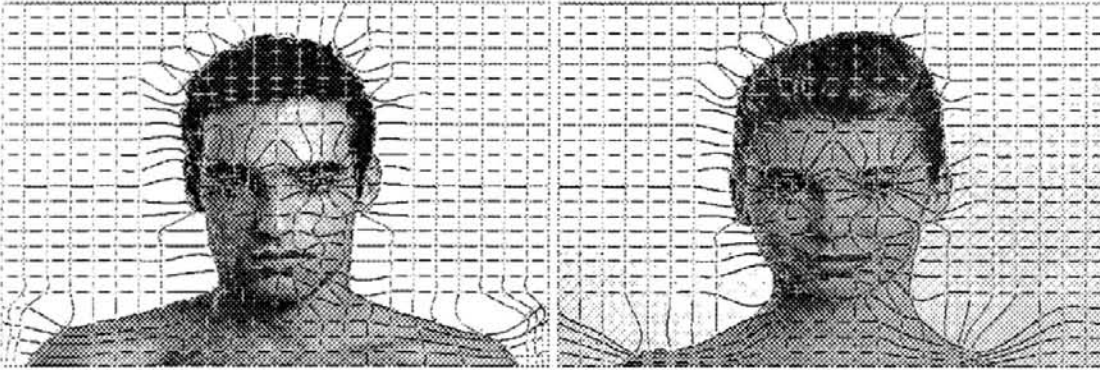


Figura 3.8: Sobreposição de imagens e malhas(faces)

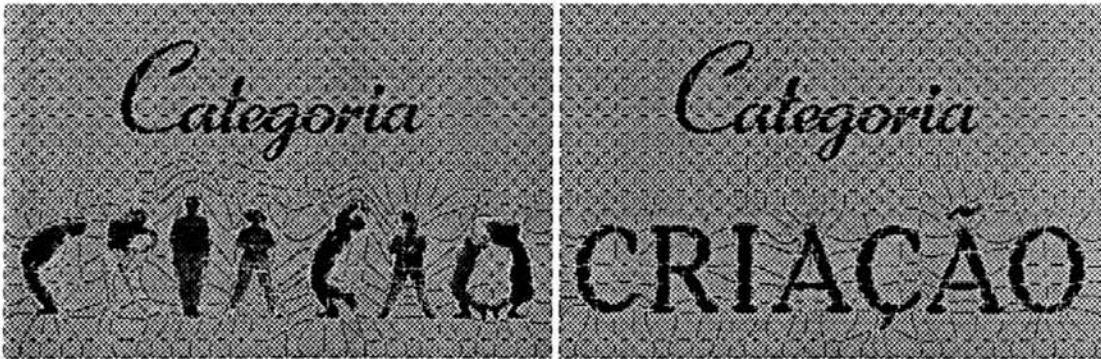


Figura 3.9: Sobreposição de imagens e malhas

Este processamento ocorre, como exposto anteriormente, segundo algoritmos *scanline*, vide figura 2.8, e, portanto, em duas etapas que serão abordadas nas seções 3.5.1 e 3.5.2.

3.5.1 Primeira Etapa

Nesta etapa é realizado o mapeamento de todas as linhas das imagens fonte e destino nas imagens intermediárias.

Por imagens intermediárias entende-se as imagens deformadas, segundo as malhas de correspondências, das imagens fonte e destino. As imagens intermediárias serão utilizadas ao final do processo para a realização da operação de *cross-dissolve*, conforme visto em 3.3.

A primeira etapa pode ser subdividida em duas fases distintas que seguem.

3.5.1.1 Fase 1

Para que o mapeamento possa ser efetuado é necessário que todas as coordenadas "x" da malha de correspondência da imagem intermediária ¹, gerada pela imagem fonte, sejam conhecidas.

Desta forma são calculados todos os polinômios cúbicos verticais que compõem a malha intermediária. Estes polinômios são encontrados através de uma interpolação nas coordenadas das malhas fonte e destino.

Assim, para cada etapa da metamorfose, é necessário encontrar uma malha intermediária que será utilizada para se obter a função de mapeamento (vide figura 3.10 ²).

3.5.1.2 Fase 2

Com base nos polinômios encontrados obtém-se todas as coordenadas "x" indispensáveis ao cálculo e, desta forma, as variações horizontais ocorridas nas regiões semelhantes. A fim de ilustrar o processo, a figura 3.11 foi introduzida e mostra uma ampliação de uma das regiões delimitadas de uma malha de correspondência.

Considerando apenas a primeira linha da imagem ampliada da figura 3.11, para fins de simplificação, observa-se que a região delimitada pelas curvas

¹O processo será descrito para a imagem fonte, mas deve também ser aplicado na imagem destino. Este procedimento será efetuado com o intuito de simplificar a descrição do método.

²Somente as curvas verticais que compõem as malhas foram considerados, uma vez que são as utilizadas pela Fase 1.

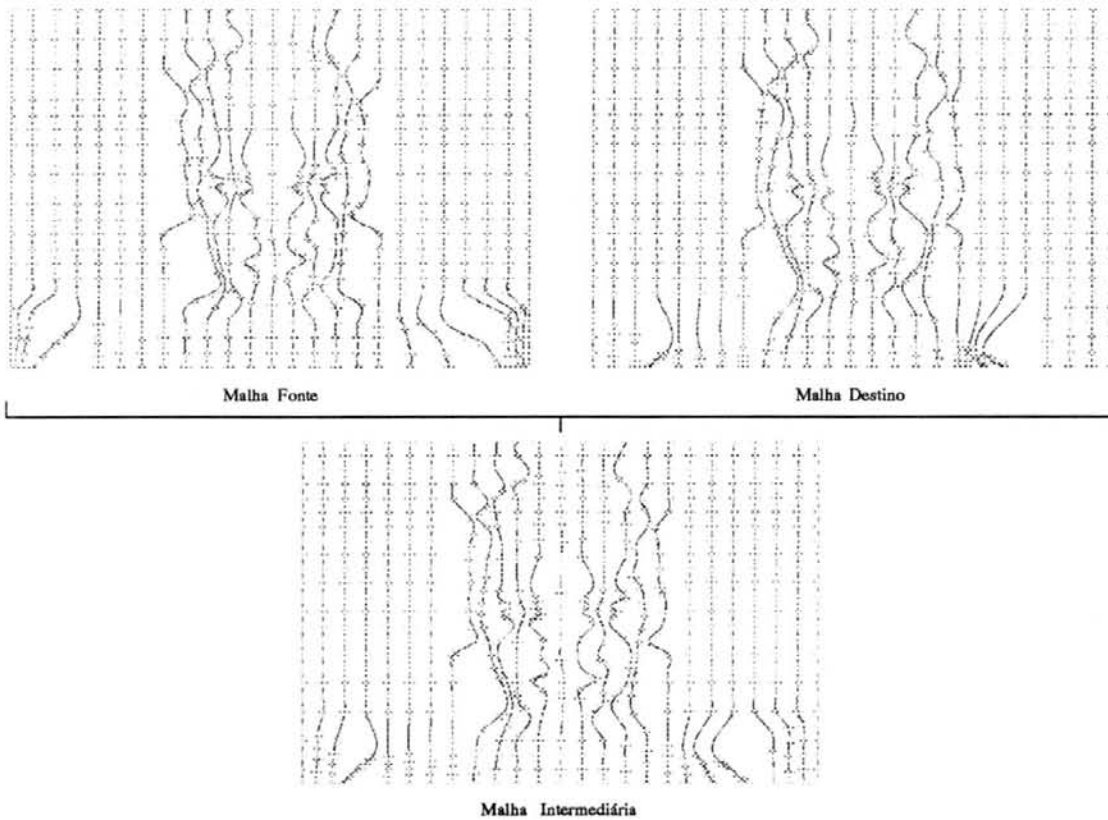


Figura 3.10: Malha intermediária (50% de deformação horizontal)

polinomial sofre uma redução. A imagem fonte possui seis *pixels* delimitados pelas curvas, enquanto que a imagem intermediária possui apenas três *pixels*.

Do mesmo modo que essa linha sofre uma redução em sua dimensão horizontal para o intervalo apresentado, as demais também apresentam alterações, tanto reduções quanto ampliações.

Baseado nas operações de escala observadas, é calculada uma função de mapeamento que estabelece a influência de cada *pixel* da imagem fonte na imagem intermediária (Mapeamento Direto).

Ao término do cálculo da função de mapeamento, ela é passada para o processo de reamostragem que efetuará a geração da imagem intermediária com base nas deformações horizontais ³.

³A reamostragem é realizada segundo uma interpolação linear, conforme descrito na seção 2.6.1.

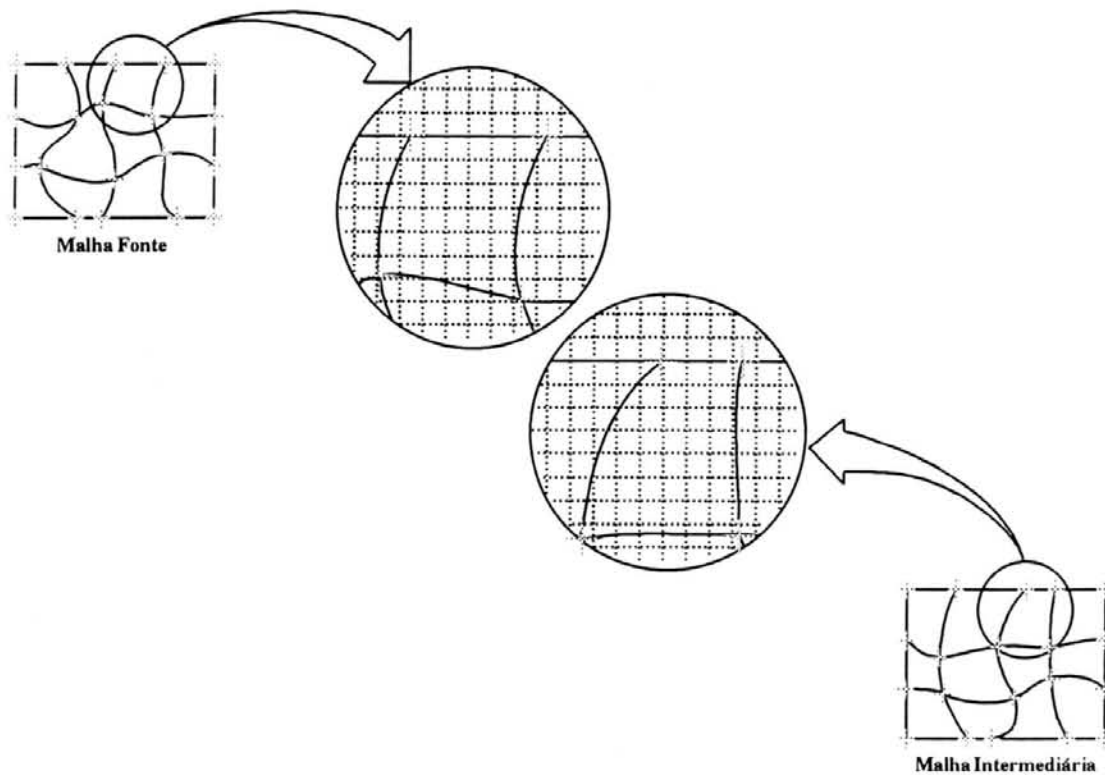


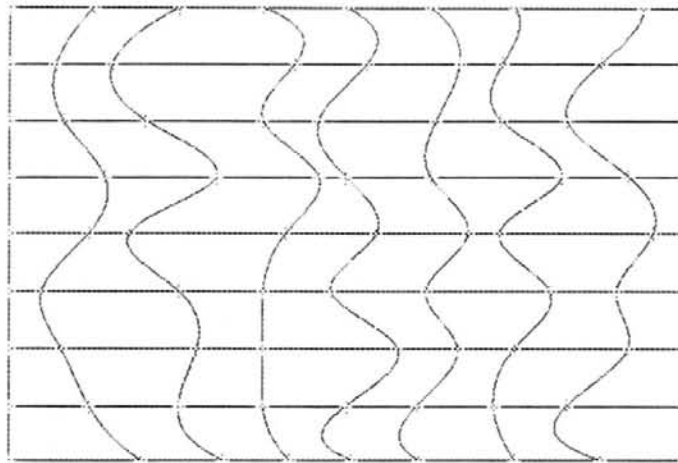
Figura 3.11: Variação das dimensões das regiões semelhantes

A figura 3.12 apresenta uma representação da primeira etapa do Método das Malhas, bem como uma imagem resultante da aplicação da mesma sobre um tabuleiro de xadrez.

3.5.2 Segunda Etapa

Esta etapa é similar a anterior, porém o mapeamento é realizado sobre todas as colunas da imagem intermediária, resultante da primeira etapa, e dá origem a imagem intermediária final que será utilizada no decorrer do processo.

Seu processamento também é dividido em duas fases que serão apresentadas nas seções 3.5.2.1 e 3.5.2.2.



Malha Intermediária(1ª Etapa)

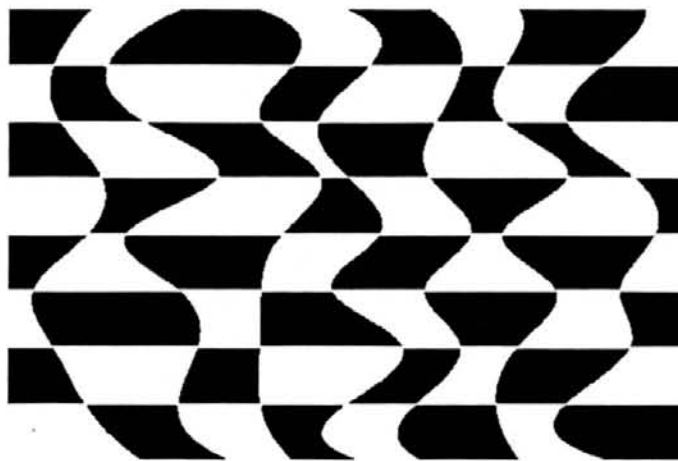


Imagem Intermediária(1ª Etapa)

Figura 3.12: Deformação horizontal de um tabuleiro de xadrez (1ª etapa)

3.5.2.1 Fase 1

Nesta fase são calculadas todas as curvas polinomiais da malha, encontradas pela interpolação dos pontos de controle das malhas fonte e destino.

A geração dessas curvas origina as coordenadas “y” das mesmas para cada coordenada “x” da imagem, o que permite, como na primeira etapa, determinar a função de mapeamento que deformará a imagem.

Este processo pode ser visualizado através da figura 3.13, onde a malha intermediária é apresentada através da interpolação linear entre as malhas fonte e destino ⁴.

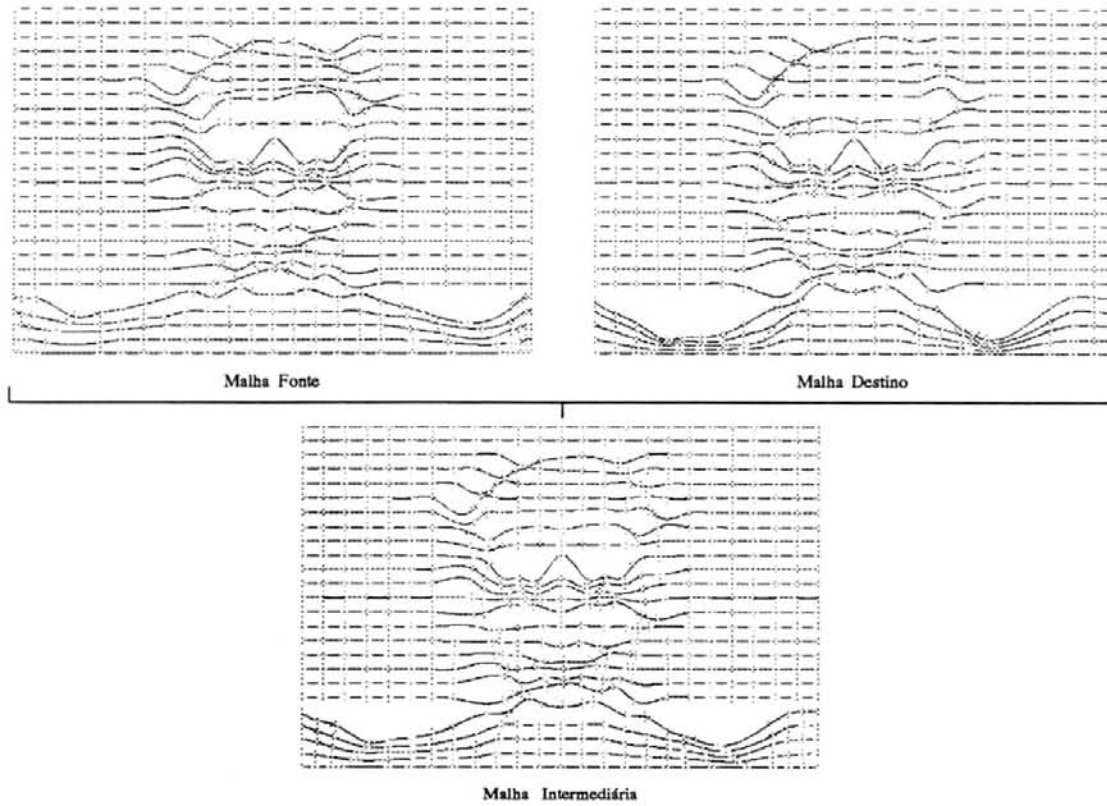


Figura 3.13: Malha intermediária (50% de deformação vertical)

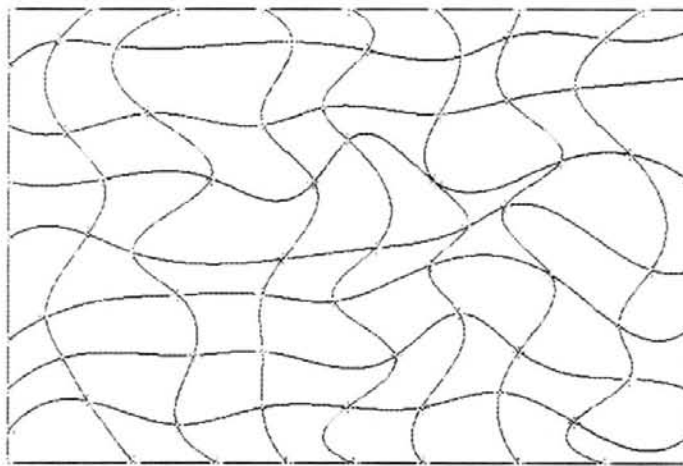
3.5.2.2 Fase 2

Os polinômios resultantes da fase anterior originam uma função de mapeamento que estabelece a influência da imagem fonte na intermediária. Através da figura 3.11 é possível notar que a imagem fonte sofre modificações nas regiões delimitadas pelas malhas. Essas modificações ocorrem sob a forma de ampliações e reduções e, no exemplo, identifica-se que a primeira coluna sofre uma ampliação.

⁴Foram consideradas apenas as curvas horizontais, pois são as utilizadas pela segunda etapa

Desta forma a imagem calculada pela primeira etapa é passada para o processo de reamostragem que através de uma interpolação linear realiza a deformação vertical imposta pelas malhas, originando a imagem intermediária final.

A figura 3.14 apresenta o processo de deformação completa de uma imagem de um tabuleiro de xadrez.



Malha Intermediária(2ª Etapa)

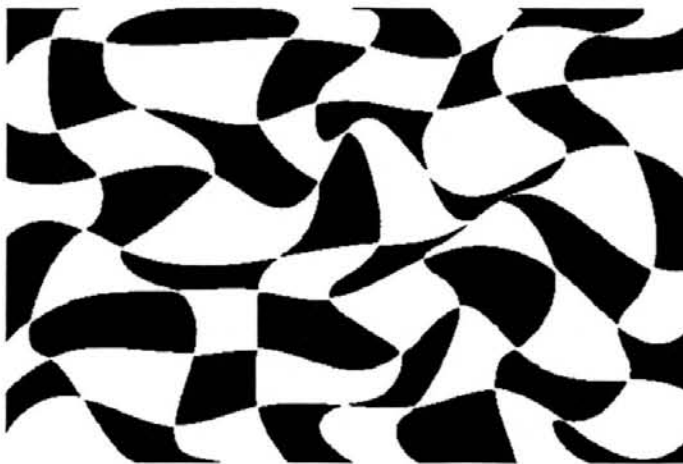


Imagem Intermediária(2ª Etapa)

Figura 3.14: Deformação completa de um tabuleiro de xadrez (2ª etapa)

3.5.3 Restrições do Método

Para que o Método das Malhas possua alto desempenho de processamento algumas restrições são impostas.

Estas restrições contribuem para a velocidade de cálculo e geração das imagens intermediárias. São enumeradas por

1. tamanho igual de imagens,
2. tamanho igual das malhas,
3. curvas delimitantes externas indeformáveis e
4. cruzamento de curvas

e serão abordadas nas próximas seções.

3.5.3.1 Tamanho Igual de Imagens

Esta restrição estabelece que as imagens fonte, destino e, em consequência, a intermediária devem possuir as mesmas dimensões. Isto torna o cálculo facilitado, pois não há variações, podendo ser facilmente vetorizável e implementado em *hardware* vetorial.

Caso as imagens fonte e destino possuam dimensões diferentes elas devem passar por uma adequação de tamanho, no qual sofrem uma operação de escala, para que suas dimensões fiquem compatíveis antes do processamento do método.

Do mesmo modo se a imagem a ser gerada tiver de possuir tamanho diferente das imagens fonte e destino ela sofrerá a operação de escala ao término do processamento.

3.5.3.2 Tamanho Igual das Malhas

Segundo esta restrição as malhas fonte e destino devem possuir a mesma dimensão, a fim de que as correspondências entre elas possam ser estabelecidas.

Deste modo pode-se garantir que existe uma mesma quantidade de regiões para as imagens fonte e destino, tornando o mapeamento direto e simplificado.

Caso as malhas possuam tamanhos diferentes é necessário realizar um ajuste prévio, pois não será possível realizar as interpolações necessárias. Este ajuste consiste em acrescentar ou subtrair curvas das malhas até que suas dimensões coincidam.

3.5.3.3 Curvas Delimitantes Externas Indeformáveis

A terceira restrição imposta pelo Método das Malhas é que os pontos de controle das curvas delimitantes externas das malhas de correspondência não podem sofrer deslocamentos em direções diferentes daquelas das curvas que eles integram. Isto é, para as curvas verticais, a mais à esquerda e a mais à direita, os pontos de controle só poderão sofrer deslocamentos verticais, enquanto que, para as curvas horizontais, a superior e a inferior, eles só poderão sofrer deslocamentos horizontais.

Esta restrição é melhor compreendida através da figura 3.15 onde as setas indicam a direção e sentido permitidos para os deslocamentos dos pontos de controle.

Nota-se através da figura 3.15 que os pontos de controle internos podem sofrer deslocamentos tanto horizontais quanto verticais, enquanto que os pontos que delimitam os cantos das malhas não podem ser deslocados.

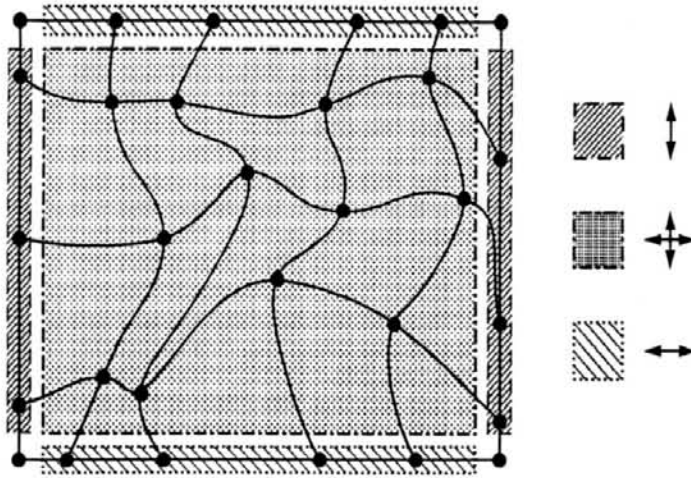


Figura 3.15: Direções permitidas para deslocamentos

Esta restrição é imposta porque facilita no cálculo das imagens intermediárias, uma vez que desta forma as imagens não sofrem alterações em suas dimensões, como visto em 3.5.3.1.

Caso os pontos das curvas externas variassem em direções contrárias as das curvas que eles integram a imagem apresentaria distorções nas bordas e o cálculo necessário para realizar o mapeamento seria mais complexo, já que para cada linha/coluna a dimensão poderia ser diferente exigindo um controle maior do algoritmo gerador.

3.5.3.4 Cruzamento de Curvas

Como foi exposto em 3.5.1 e 3.5.2, as curvas que formam as malhas de correspondência são utilizadas para o cálculo da função de mapeamento que será empregada na geração da imagem intermediária.

Esta função é encontrada pela interpolação linear entre as coordenadas das regiões delimitadas pelas curvas, o que infere erros no cálculo caso elas se interseccionem.

O erro conhecido como *foldover problem* faz com que o mapeamento seja realizado de forma indesejada como mostra a figura 3.16.

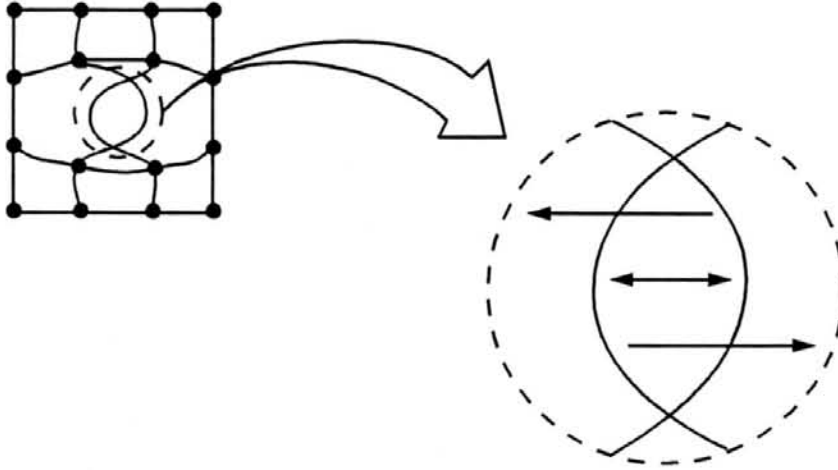


Figura 3.16: Cruzamento de curvas das malhas

Na intersecção das curvas o mapeamento é realizado para as duas regiões vizinhas o que ocasiona um erro na criação da função de mapeamento.

Para que esses erros não ocorram é necessário que as curvas sejam limitadas de forma a não se cruzarem.

Esta restrição é imposta pelo cálculo da menor distância entre duas curvas, o qual nunca deve ser igual a zero.

A fim de se esclarecer o cálculo da menor distância entre duas curvas a seção 3.5.3.5 será introduzida.

3.5.3.5 Menor Distância entre Duas Curvas

Como visto em 3.5 as curvas que determinam as malhas de correspondência são polinômios interpoladores cúbicos, vide 2.6.2.

Em sua forma paramétrica genérica expressa através de uma equação vetorial eles podem ser representados pela equação 3.1 e melhor abordados em Mortenson [MOR85] e Pinheiro [PIN92].

$$\vec{f}(u) = \vec{a}_3 u^3 + \vec{a}_2 u^2 + \vec{a}_1 u + \vec{a}_0 \quad (3.1)$$

onde $\vec{f}(u)$ representa a posição de qualquer ponto pertencente ao polinômio e \vec{a}_0 , \vec{a}_1 , \vec{a}_2 e \vec{a}_3 são os vetores equivalentes aos coeficientes algébricos escalares.

A variável paramétrica u deve pertencer ao intervalo

$$u \in [0; 1].$$

Com base nesta definição resta introduzir o conceito de vetores tangentes à curva.

Os vetores tangentes a uma curva $\vec{f}(u)$ são expressos por $\frac{d\vec{f}(u)}{du}$ e, portanto, são uma derivada da mesma com relação à variável paramétrica u .

Estes vetores são descritos em maior detalhe em Mortenson [MOR85] e Pinheiro [PIN92] e podem ser representados pela figura 3.17.

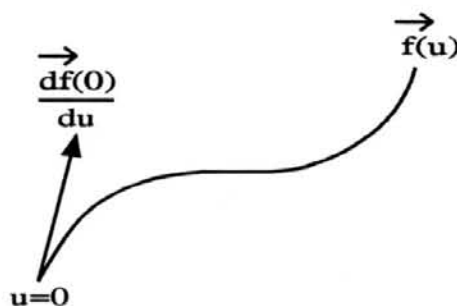


Figura 3.17: Vetores tangentes a uma curva

Utilizando os conceitos apresentados, chega-se ao cálculo da menor distância entre duas curvas.

Sejam as curvas paramétricas $\vec{f}(s)$ e $\vec{g}(t)$, a menor distância entre elas é expressa por d_{min} , representada pela figura 3.18, onde \vec{f}^s e \vec{g}^t são as primeiras derivadas em relação a s e t respectivamente.

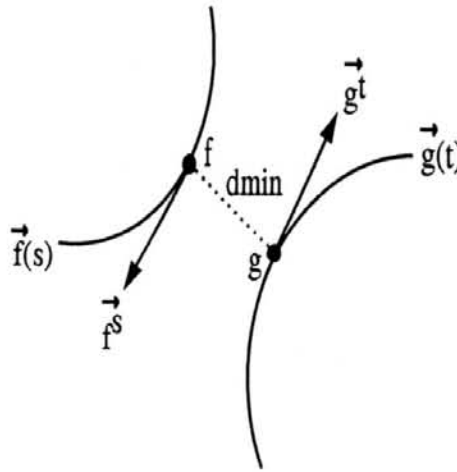


Figura 3.18: Menor distância entre duas curvas

A determinação de d_{min} é dada por

$$d_{min} = |\vec{f} - \vec{g}|$$

onde \vec{f} e \vec{g} são os pontos das curvas que satisfazem as equações

$$(\vec{f} - \vec{g}) \cdot \vec{f}^s = 0 \quad (3.2)$$

e

$$(\vec{f} - \vec{g}) \cdot \vec{g}^t = 0. \quad (3.3)$$

Duas equações não-lineares simultâneas onde somente os pares (s_i, t_i) no intervalo $s, t \in [0; 1]$ são relevantes. Os pontos extremos também devem ser testados para verificar possíveis intersecções.

Se ocorrer do valor encontrado ser igual a zero, a malha apresenta um cruzamento em suas curvas e, portanto, acarretará um erro na geração da imagem. Assim estas deformações devem ser evitadas.

3.6 Resultados Obtidos

Nesta seção serão apresentados alguns resultados obtidos através da aplicação do Método das Malhas para os exemplos apresentados nas figuras 3.1, 3.8 e 3.9.

A análise destes resultados fica a cargo do capítulo 4 onde um quadro comparativo entre os métodos de *morphing* é elaborado.

O exemplo de deformação de imagens representado pela figura 3.1 utiliza a mesma imagem para as imagens fonte e destino, porém há uma deformação na malha destino para que o efeito seja alcançado. A diferença do tempo de processamento com relação ao processo de *morphing* pode ser percebida devido à exclusão do processo de *cross-dissolve* e é evidenciada através da tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tempo de processamento para deformação de imagens

Resolução das Imagens	Dimensões da Malha	Tempo de Processamento	Número de Frames	Tempo Médio por Frame
500x350 <i>pixels</i>	25x25 pontos	45,00 segundos	15	3,00 segundos

Uma seqüência dos quadros gerados para a deformação citada pode ser visualizada através da figura 3.19.

Tomando-se, como segundo exemplo, a metamorfose entre duas faces, representada pela figura 3.8, obtiveram-se os dados da tabela 3.6.

A figura 3.20 apresenta o conjunto das 15 imagens de transição entre as imagens da figura 3.8.

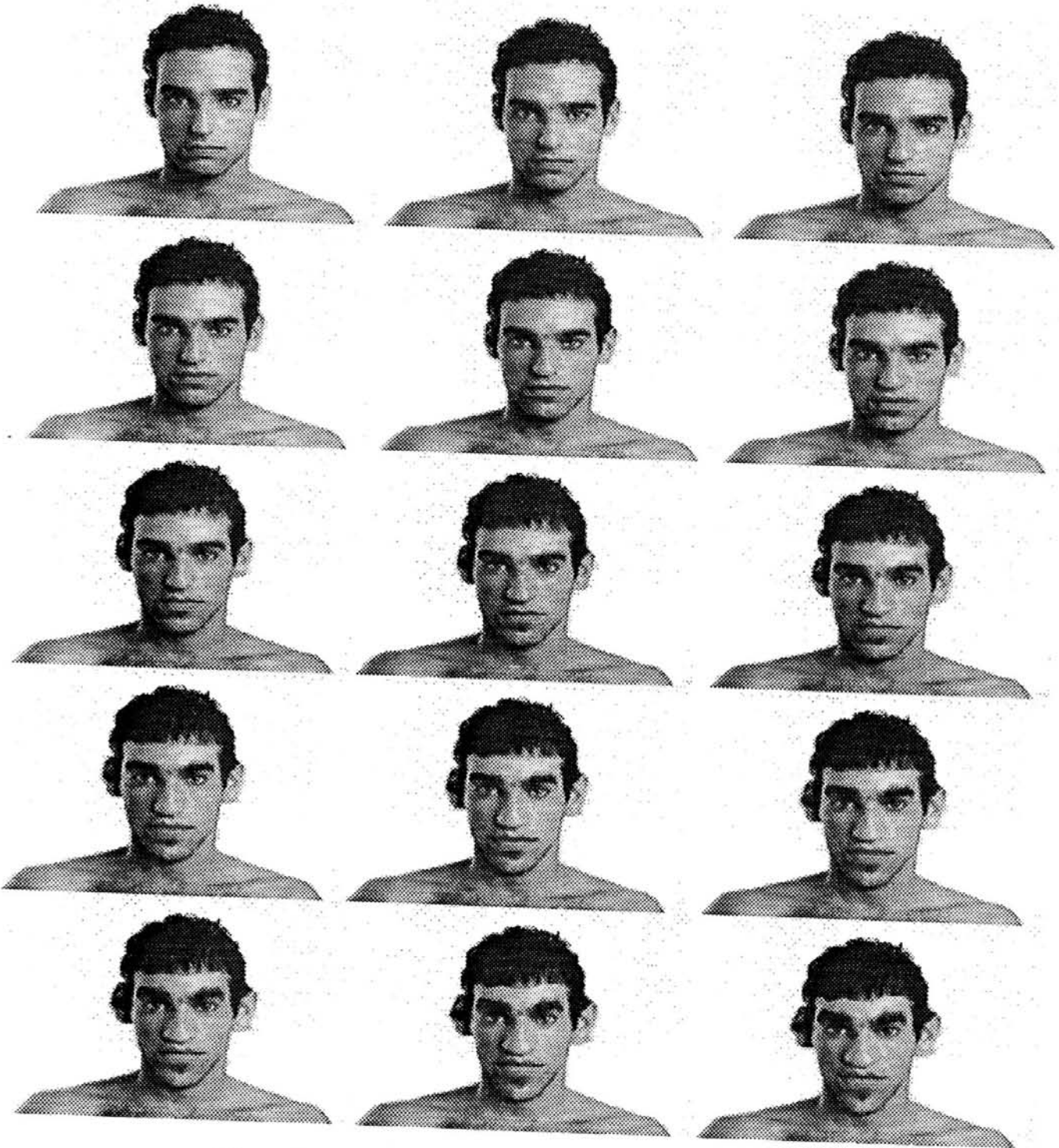


Figura 3.19: Seqüência de deformação de uma imagem

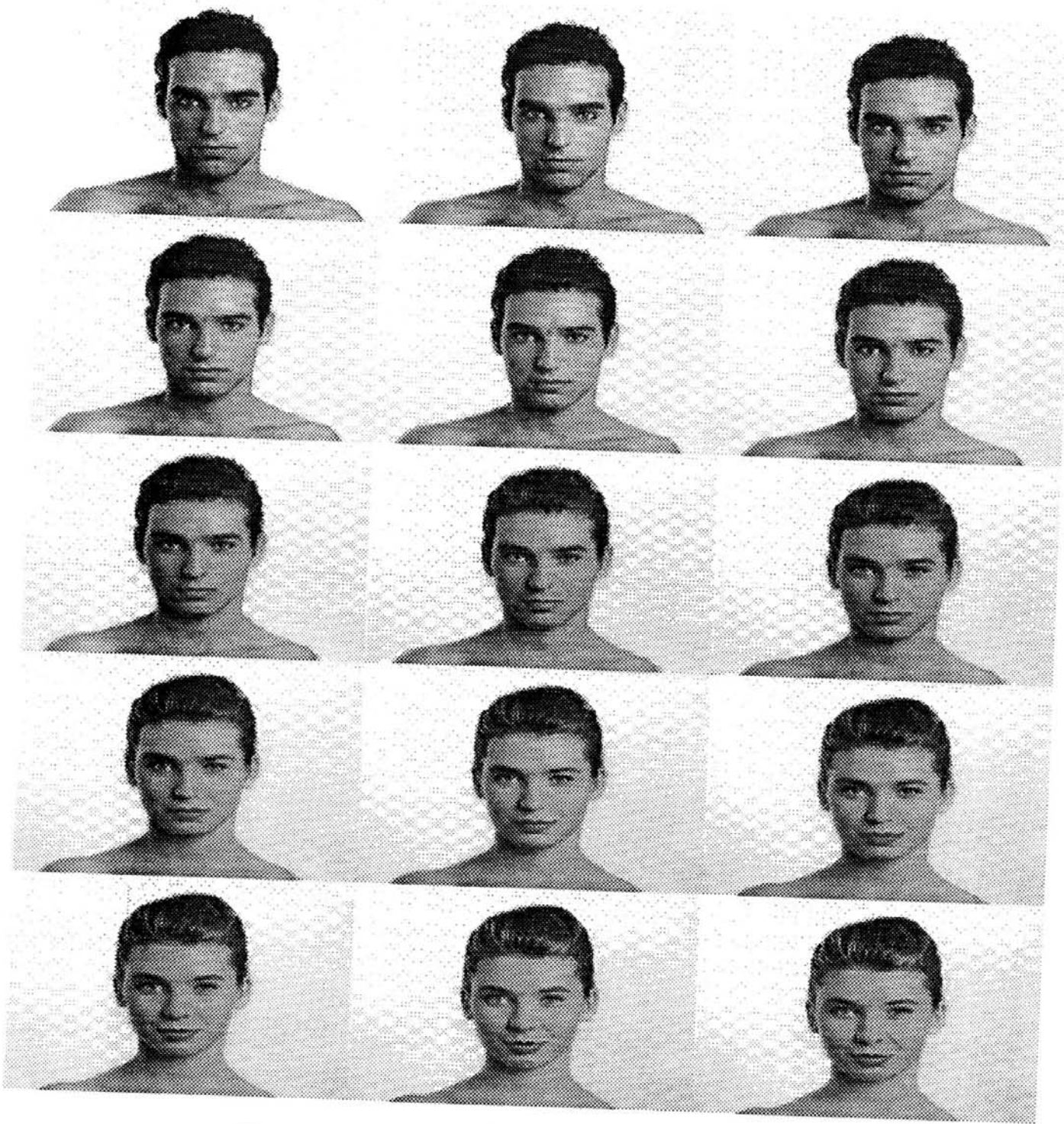


Figura 3.20: Seqüência de *morphing* entre duas faces

Tabela 3.2: Tempo de processamento para *morphing* entre faces

Resolução das Imagens	Dimensões da Malha	Tempo de Processamento	Número de Frames	Tempo Médio por Frame
500x350 <i>pixels</i>	25x25 pontos	93,15 segundos	15	6,21 segundos

Da mesma forma para as imagens da figura 3.9 obtiveram-se os dados da tabela 3.3 e a figura 3.21.

Tabela 3.3: Tempo de processamento para *morphing* entre imagens

Resolução das Imagens	Dimensões da Malha	Tempo de Processamento	Número de Frames	Tempo Médio por Frame
500x321 <i>pixels</i>	30x20 pontos	87,15 segundos	15	5,81 segundos

3.7 Método dos Campos de Influência

Este processo baseia-se na demarcação de regiões semelhantes pela utilização de vetores que estabelecem a posição de amostragem na imagem fonte para cada *pixel* da imagem intermediária.

Quanto mais próximos os pontos estiverem dos vetores mais forte será a influência destes. O que significa que os pontos sofrem deformações segundo a deformação dos vetores que os cercam.

O processo de demarcação de semelhanças é mais simples do que para o método das malhas, uma vez que somente é necessário demarcar os contornos das imagens, nas regiões de interesse. Contudo, esta demarcação deve levar em conta que o método possui influência global, *i.e.*, todos os vetores influenciam no cálculo da imagem intermediária e, portanto, a alteração de um vetor pode alterar toda a imagem.

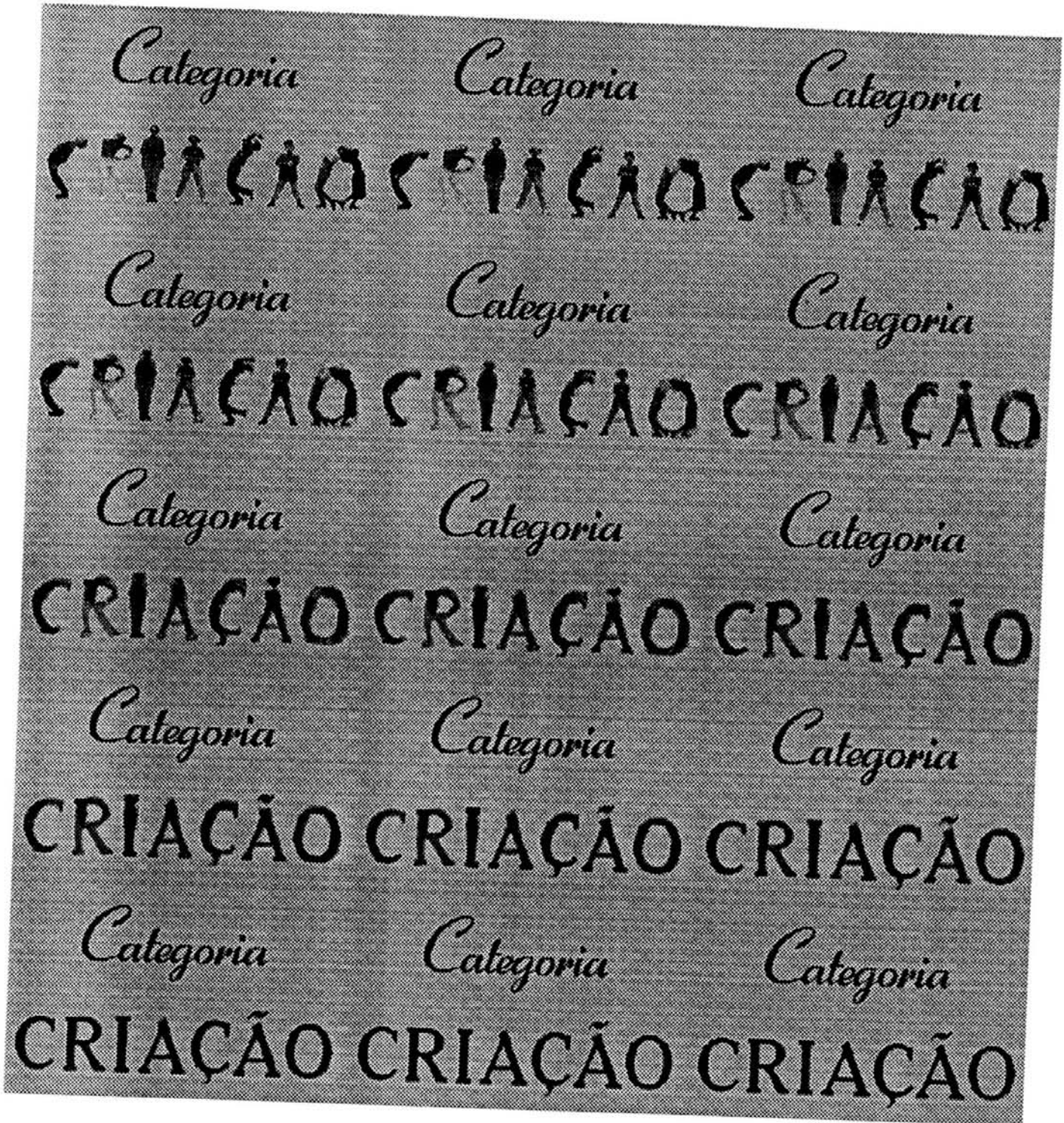


Figura 3.21: Seqüência de *morphing* entre duas imagens

Como exemplo é utilizada a figura 3.4 sobre a qual são demarcados os vetores de influência, sendo estes identificados na figura 3.22.

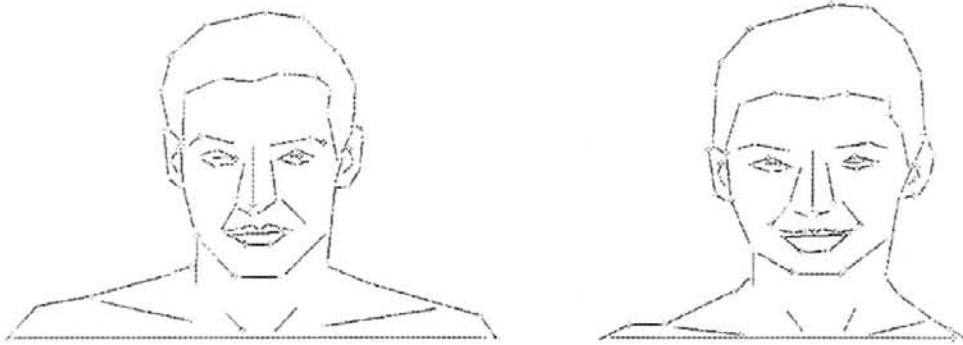


Figura 3.22: Vetores de influência

Realizando a sobreposição das figuras 3.4 e 3.22 origina-se a figura 3.23 onde pode-se identificar as regiões que sofrem deformações, através dos deslocamentos sofridos pelos vetores.



Figura 3.23: Sobreposição de imagens e vetores

Para que este método seja melhor compreendido ele será dividido em duas etapas

- *morphing* com um par de vetores e
- *morphing* com múltiplos pares de vetores

que são abordadas nas próximas seções.

Esta divisão se fez necessária porque o método utiliza um princípio básico que é estendido quando da utilização de vários vetores.

3.7.1 *Morphing* com Um Par de Vetores

Como exposto anteriormente o Método dos Campos de Influência baseia-se em vetores e, para o caso mais simples, utiliza um vetor para a imagem fonte e um para a destino.

Esses vetores são interpolados para gerar as imagens intermediárias que são utilizadas pelo processo de *cross-dissolve*.

Segundo Beier [BEI92] a interpolação dos vetores pode ser efetuada de duas maneiras:

- interpolação linear dos pontos extremos dos vetores e
- interpolação do centro, direção e tamanho dos vetores.

Na interpolação dos pontos extremos ocorre uma transformação de escala no vetor quando este sofre uma operação de rotação, vide figura 3.24.

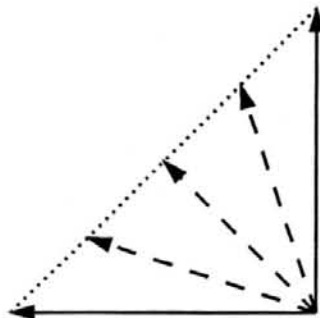


Figura 3.24: Interpolação linear dos pontos de um vetor

Já o segundo tipo de interpolação pode ocorrer de forma inesperada pelo usuário devido às transformações envolvidas, vide figura 3.25.

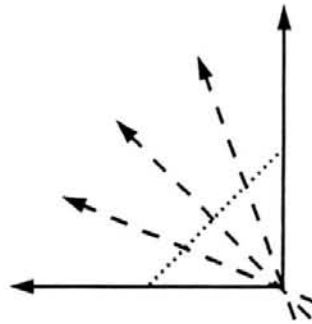


Figura 3.25: Interpolação do centro, direção e tamanho de um vetor

A utilização de um par de vetores e as variáveis envolvidas no cálculo das imagens podem ser observadas na figura 3.26.

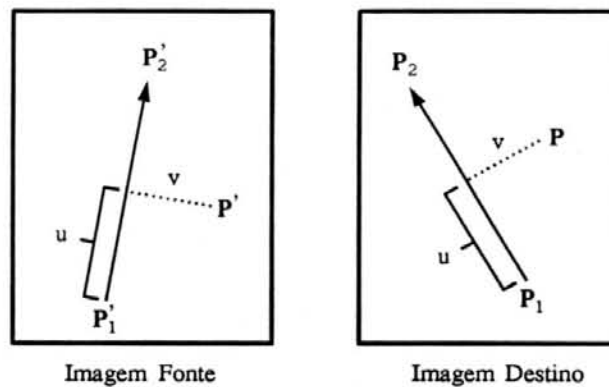


Figura 3.26: Utilização de um par de vetores

A variável paramétrica u indica a posição normalizada, pelo tamanho do vetor, do *pixel* da imagem intermediária com relação a este vetor. A variável v indica a distância perpendicular em *pixels* do ponto em questão até o vetor na posição u .

Como a variável u é normalizada ela varia no intervalo $[0; 1]$, à medida que o ponto a ser amostrado se afasta de um dos pontos extremos do vetor e se aproxima do outro, é negativa se estiver localizado abaixo do ponto \vec{P}_1 e maior que 1 se situar-se além da posição de \vec{P}_2 .

Para o cálculo de u utiliza-se

$$u = \frac{(\vec{P} - \vec{P}_1) \cdot (\vec{P}_2 - \vec{P}_1)}{|\vec{P}_2 - \vec{P}_1|^2} \quad (3.4)$$

onde \vec{P} é um ponto qualquer da imagem intermediária.

Esse cálculo realiza uma projeção do vetor $(\vec{P} - \vec{P}_1)$ sobre o vetor $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$ que ao ser dividida pelo quadrado do módulo de $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$ determina o intervalo de variação normalizado, conforme mostra a figura 3.27.

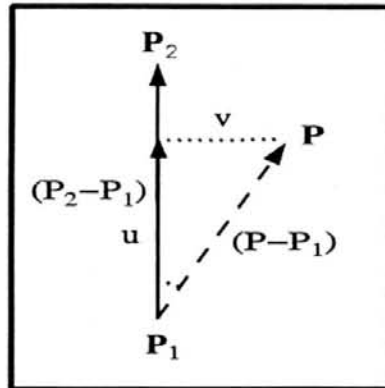


Figura 3.27: Projeção do vetor $(\vec{P} - \vec{P}_1)$ sobre $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$

Já para o cálculo de v emprega-se

$$v = \frac{(\vec{P} - \vec{P}_1) \cdot \text{perpendicular}(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)}{|\vec{P}_2 - \vec{P}_1|} \quad (3.5)$$

onde *perpendicular()* é uma função que retorna um vetor perpendicular e de mesmo tamanho do vetor passado como parâmetro. Uma vez que existem dois vetores perpendiculares a um vetor qualquer no plano é necessário escolher um e usá-lo consistentemente durante todo o processo de cálculo.

Esse vetor perpendicular pode ser facilmente encontrado pela inversão das coordenadas do vetor original e troca de sinal da primeira, por exemplo:

$$\text{perpendicular}(5, 3) = (-3, 5)$$

e é o processo utilizado pelo sistema de *morphing* implementado.

Com base nos cálculos de 3.4 e 3.5 resta calcular a posição \vec{P}' que o ponto \vec{P} da imagem intermediária ocupa na imagem fonte.

O cálculo de \vec{P}' pode ser denotado por

$$\vec{P}' = \vec{P}_1 + u \cdot (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) + \frac{v \cdot \text{perpendicular}(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)}{|\vec{P}_2 - \vec{P}_1|} \quad (3.6)$$

e é obtido aplicando-se os valores de u e v para o vetor $(\vec{P}_2 - \vec{P}_1)$ (vide figura 3.26).

Este método realiza as operações de rotação, translação e escala segundo a orientação, posição e tamanho dos vetores e como a variável u é normalizada pelo tamanho do vetor e v não, a operação de escala é efetuada de acordo com a direção e comprimento do mesmo [BEI92].

Os *pixels* da imagem fonte são copiados para a imagem intermediária sendo necessária uma etapa de recorte caso o valor encontrado para \vec{P}' localize-se fora da imagem. Este processo pode ser visualizado pela figura 3.28.

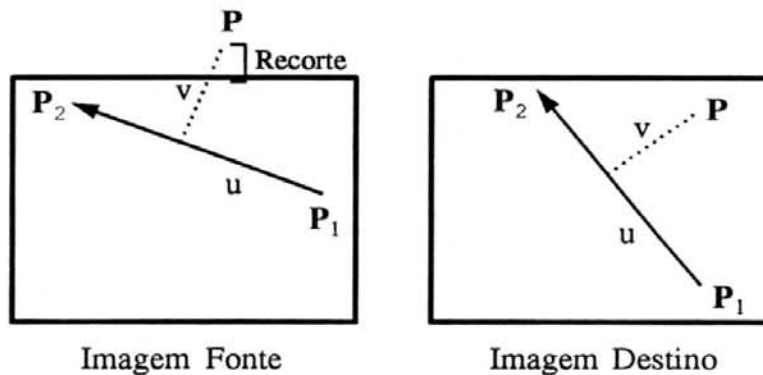


Figura 3.28: Recorte de imagem

Para se obter uma rotação, basta rotacionar o vetor da imagem destino que a imagem sofrerá a operação. Porém, para que a mesma conserve suas proporções, é necessário que os vetores permaneçam com o mesmo tamanho antes e depois da rotação.

Para translação basta mover o vetor, também tomando cuidado quanto ao tamanho para não ocorrer uma operação de escala.

Todas as operações efetuadas com um par de vetores são transformações afins, porém nem todas as transformações afins podem ser efetuadas, em especial, as transformações de escala uniforme não são possíveis (vide figura 3.29).



Figura 3.29: Operação de escala não uniforme

3.7.2 *Morphing* com Múltiplos Pares de Vetores

Como exposto anteriormente a utilização de vários pares de vetores é uma extensão do caso particular de um par de vetores, na qual é possível especificar transformações complexas.

Através da especificação de vetores delimitando os contornos das imagens é possível estabelecer um vetor resultante que identifica a posição do *pixel* \vec{P} da imagem intermediária na imagem fonte, conforme figura 3.30.

Desta forma para cada ponto da imagem é necessário o cálculo do vetor resultante que é obtido pela interpolação dos vetores $(\vec{P}'_i - \vec{P})$ oriundos dos cálculos de 3.4 e 3.5.

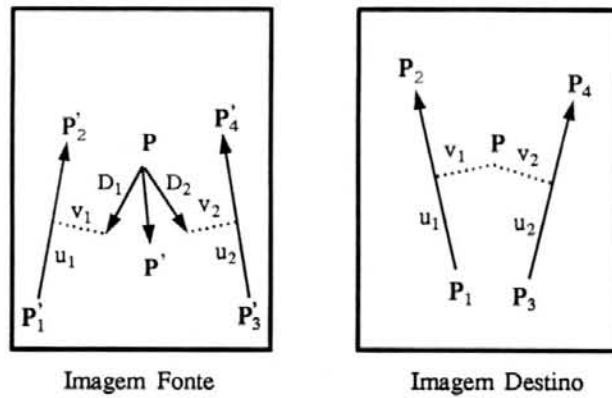


Figura 3.30: Múltiplos pares de vetores

A interpolação mencionada baseia-se em uma média ponderada das posições \vec{P}'_i encontradas e os pesos levam em consideração a distância do *pixel* \vec{P} , em questão, aos vetores.

Esses pesos também estabelecem que *pixels* situados em cima dos vetores possuem alto grau de influência sobre a imagem resultante, enquanto que, quanto maior, a distância que os separam menor essa influência.

Uma equação que satisfaz a essas exigências encontra-se definida em Beier [BEI92] e pode ser expressa por

$$peso = \left(\frac{tamanho^p}{(a + dist)} \right)^b \quad (3.7)$$

onde *tamanho* é o comprimento do vetor em questão, na imagem intermediária, *dist* é a distância do ponto \vec{P} ao vetor e *a*, *b* e *p* são constantes introduzidas para proporcionar maior flexibilidade à fórmula. Assim se *a* e *dist* forem iguais a zero, o peso do vetor analisado será infinito sobre o ponto, fazendo com que os *pixels* em cima deste vetor realizem uma deformação bem comportada. Isto é, o usuário pode determinar onde a deformação ocorrerá.

A variável b determina como é a contribuição dos vetores com relação à distância. Se for zero todos os vetores possuem o mesmo peso, caso contrário quanto maior o valor de b mais forte será a influência do vetor mais próximo ao ponto \vec{P} .

Já a variável p indica a contribuição dos vetores segundo seus módulos. Ela varia no intervalo $[0; 1]$ e caso seu valor seja zero todos os vetores possuem pesos relativos iguais, senão quanto maior o vetor maior o peso relativo deste.

O cálculo de $dist$ deve levar em conta se a variável u situa-se no intervalo $[0; 1]$ ou não, e pode ser definida como

$$dist = \begin{cases} |\vec{P} - \vec{P}_1| & , \quad u < 0 \\ abs(v) & , \quad 0 \leq u \leq 1 \\ |\vec{P} - \vec{P}_2| & , \quad u > 1 \end{cases} .$$

Baseado no cálculo da equação 3.7 e nos vetores $\vec{D}_i = \vec{P}'_i - \vec{P}_i$ chega-se ao cálculo ponderado da soma dos vetores \vec{D}_i

$$Soma\vec{D} = \sum_{i=1}^n \vec{D}_i \cdot peso_i \quad (3.8)$$

e ao somatório dos pesos

$$SomaP = \sum_{i=1}^n peso_i. \quad (3.9)$$

As equações 3.8 e 3.9 são utilizadas para o cálculo do ponto \vec{P}' que é dado por

$$\vec{P}' = \vec{P} + \frac{Soma\vec{D}}{SomaP} \quad (3.10)$$

e amostrado na imagem fonte. Desta forma o ponto \vec{P}' é constituído pela soma do ponto \vec{P} , em questão, da imagem intermediária com o vetor resultante da média ponderada entre os vetores \vec{D}_i calculados, o que pode ser visualizado e melhor compreendido através da figura 3.30.

O processo de deformação de imagens conclui suas atividades quando tanto a imagem deformada da imagem fonte quanto a da destino estiverem geradas e suas características se sobrepuserem, sendo então iniciado o processo de *cross-dissolve*.

Esta etapa é idêntica a do Método das Malhas e realiza a fusão das imagens deformadas segundo uma interpolação que define a velocidade do processo de *Morphing*.

3.7.3 Restrições do Método

O Método dos Campos de Influência impõe certas restrições ao processamento das imagens e estas devem ser conhecidas para se obter resultados satisfatórios:

1. tamanho igual de imagens,
2. número igual de vetores,
3. cruzamento de vetores e
4. deslocamentos irregulares.

3.7.3.1 Tamanho Igual de Imagens

Como para o Método das Malhas, neste método existe a necessidade de que tanto a imagem fonte quanto a destino possuam as mesmas dimensões.

Esta restrição facilita o cálculo das imagens deformadas, uma vez que não é preciso calcular funções para interpolação de tamanho.

Assim, as imagens calculadas apresentam dimensões iguais, e caso necessário um tamanho diferente para a imagem de saída, ela sofre uma operação de escala ao término do processo de *morphing*.

3.7.3.2 Número Igual de Vetores

Este método também necessita que o número de primitivas de controle seja igual para ambas as imagens.

Desta forma o número de vetores atribuídos para a imagem fonte deve ser igual ao número de vetores da imagem destino, estabelecendo uma correspondência direta entre elas.

Esta correspondência especifica as regiões que sofrem deslocamentos e, portanto, é a responsável pela função de mapeamento.

Para que esta restrição seja respeitada os sistemas que implementam este método criam vetores em ambas as imagens, quando do estabelecimento das regiões semelhantes, permitindo que estes sejam alterados posteriormente.

3.7.3.3 Cruzamento de Vetores

Esta é uma restrição imposta para que nas situações em que a variável a for zero não ocorra um ponto no qual os pesos dos vetores que se cruzam sejam infinitos para todos eles.

O efeito produzido pelo cruzamento de vetores pode ser observado pela figura 3.31, sendo que este cruzamento deve ser evitado quando do estabelecimento das correspondências.

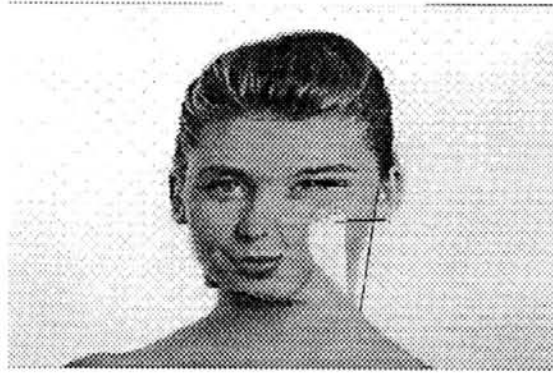


Figura 3.31: Cruzamento de vetores

Uma das formas utilizadas para evitar a intersecção de vetores é a verificação do cruzamento. Esta verificação é simples de ser realizada e, caso encontre dois ou mais vetores que se cruzem, deve identificá-los. Sendo seu cálculo efetuado através da resolução dos sistemas

$$\begin{cases} x(u) = u.x_2 + (1 - u).x_1 \\ y(u) = u.y_2 + (1 - u).y_1 \end{cases}$$

e

$$\begin{cases} x(v) = v.x_4 + (1 - v).x_3 \\ y(v) = v.y_4 + (1 - v).y_3 \end{cases}$$

os quais devem satisfazer

$$x(u) = x(v)$$

e

$$y(u) = y(v)$$

no intervalo $0 \leq u, v \leq 1$.

Se a resolução dos sistemas encontrar valores para u e v no intervalo citado, os vetores utilizados para o cálculo apresentam uma intersecção, a qual deve ser eliminada pela alteração dos pontos extremos dos vetores.

3.7.3.4 Deslocamentos Irregulares

O Método dos Campos de Influência pode introduzir deformações indesejáveis entre as linhas, conhecidas como “fantasmas”.

Essas deformações originam-se devido a certos deslocamentos sofridos pelos vetores que alteram a posição de amostragem na imagem fonte.

Os “fantasmas” podem ser melhor compreendidos através da figura 3.32, onde pode-se notar que quando um dos vetores sofre um deslocamento parte da imagem também se desloca, porém outra parte permanece fixa devido à contribuição do segundo vetor.

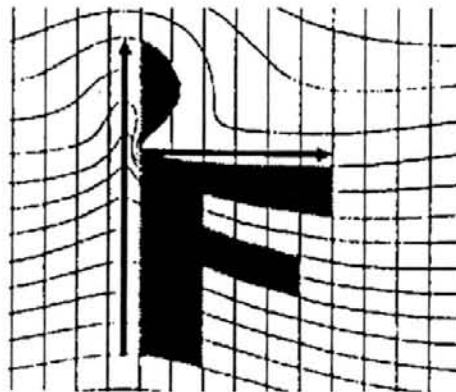


Figura 3.32: Ocorrência de “fantasmas” [BEI92]

A parte que não sofre deslocamentos é resultante de um erro que pode ser evitado através

- de uma operação de escala ou

- da inclusão de um novo vetor,

conforme ilustrado pelas figuras 3.33 e 3.34.

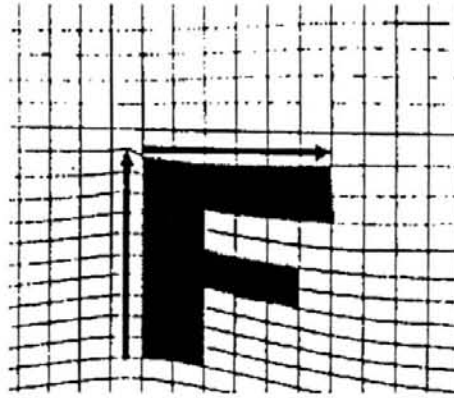


Figura 3.33: Eliminação de fantasmas por operação de escala [BEI92]

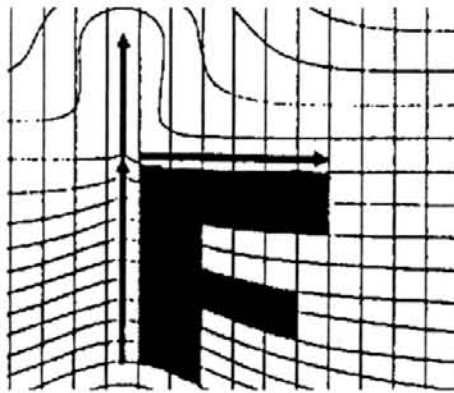


Figura 3.34: Eliminação de fantasmas por inclusão de vetor [BEI92]

Beier [BEI92] sugere a utilização de um sistema para identificar o aparecimento de “fantasmas”. Segundo este sistema o usuário aponta na imagem intermediária o ponto com problema e este ponto é apresentado na imagem fonte, facilitando a identificação dos vetores que ocasionam o erro.

3.7.4 Resultados Obtidos

A utilização do Método dos Campos de Influência na geração de seqüências animadas de *morphing* têm demonstrado que este método é bastante otimizado quando da demarcação das regiões semelhantes entre as imagens, porém seu

processamento é bastante lento se comparado com o Método das Malhas. Esta característica pode ser observada nas tabelas que seguem.

A tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos para a seqüência de deformação de imagens apresentada pela figura 3.35.

Tabela 3.4: Tempo de processamento para deformação de imagens

Resolução das Imagens	Número de Vetores	Tempo de Processamento	Número de Frames	Tempo Médio por Frame
500x350 <i>pixels</i>	63 vetores	4923,15	15	328,21 segundos

Da mesma forma observa-se através da tabela 3.5 que o processo de *morphing* entre as imagens da figura 3.23 sofre um aumento considerável de processamento, o conjunto dos resultados da aplicação do método é apresentado pela figura 3.36.

Tabela 3.5: Tempo de processamento para *morphing* de imagens

Resolução das Imagens	Número de Vetores	Tempo de Processamento	Número de Frames	Tempo Médio por Frame
500x350 <i>pixels</i>	63 vetores	5365,95 segundos	15	357,73 segundos

É importante salientar que o resultado do método, *i.e.*, as imagens geradas, quando as características semelhantes são devidamente demarcadas, não apresenta diferenças drásticas se comparado ao Método das Malhas. A diferença se dá, como será abordado no capítulo de análise dos resultados, nos tempos envolvidos nos cálculos dessas imagens.

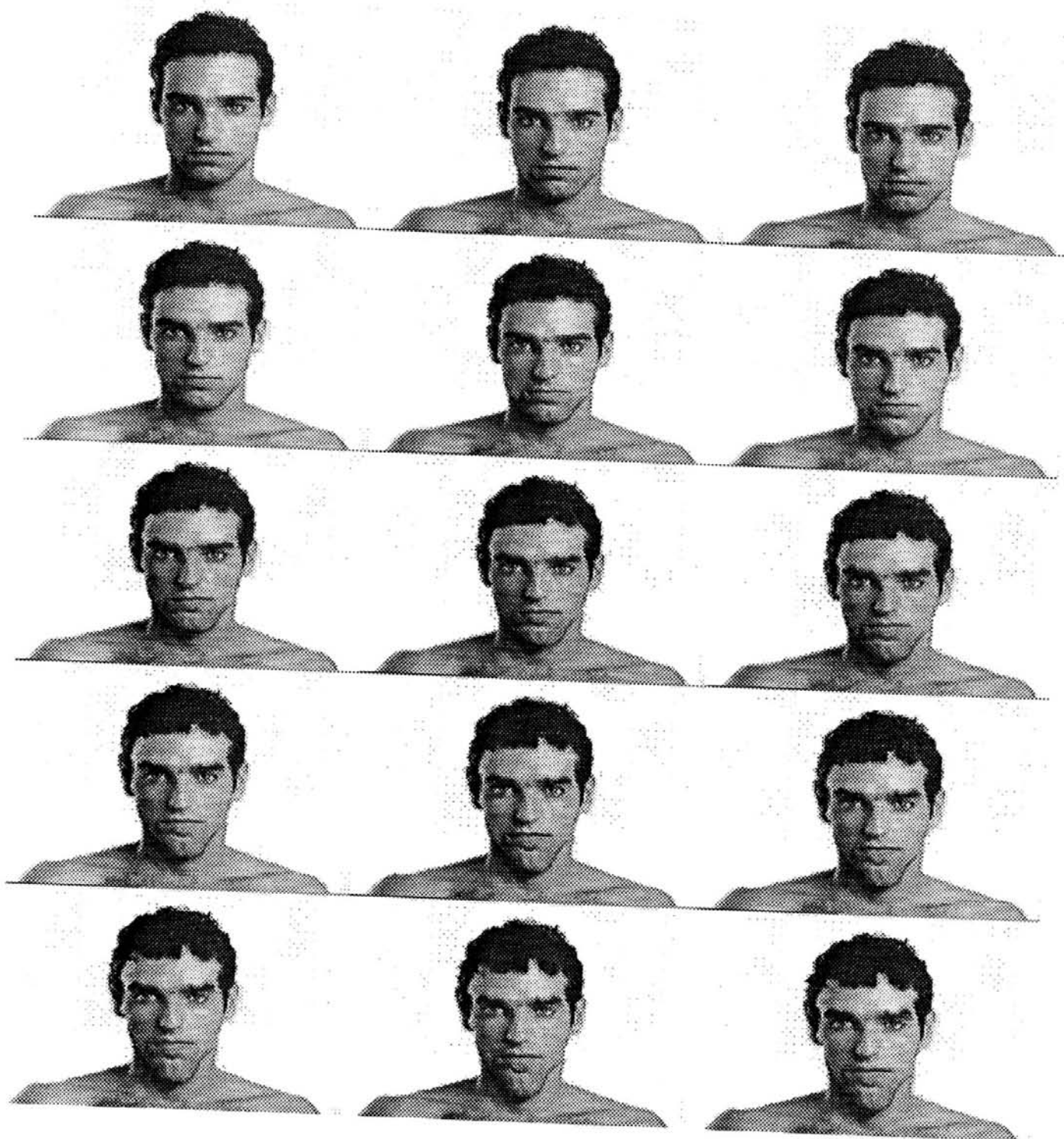


Figura 3.35: Seqüência de deformação de uma imagem

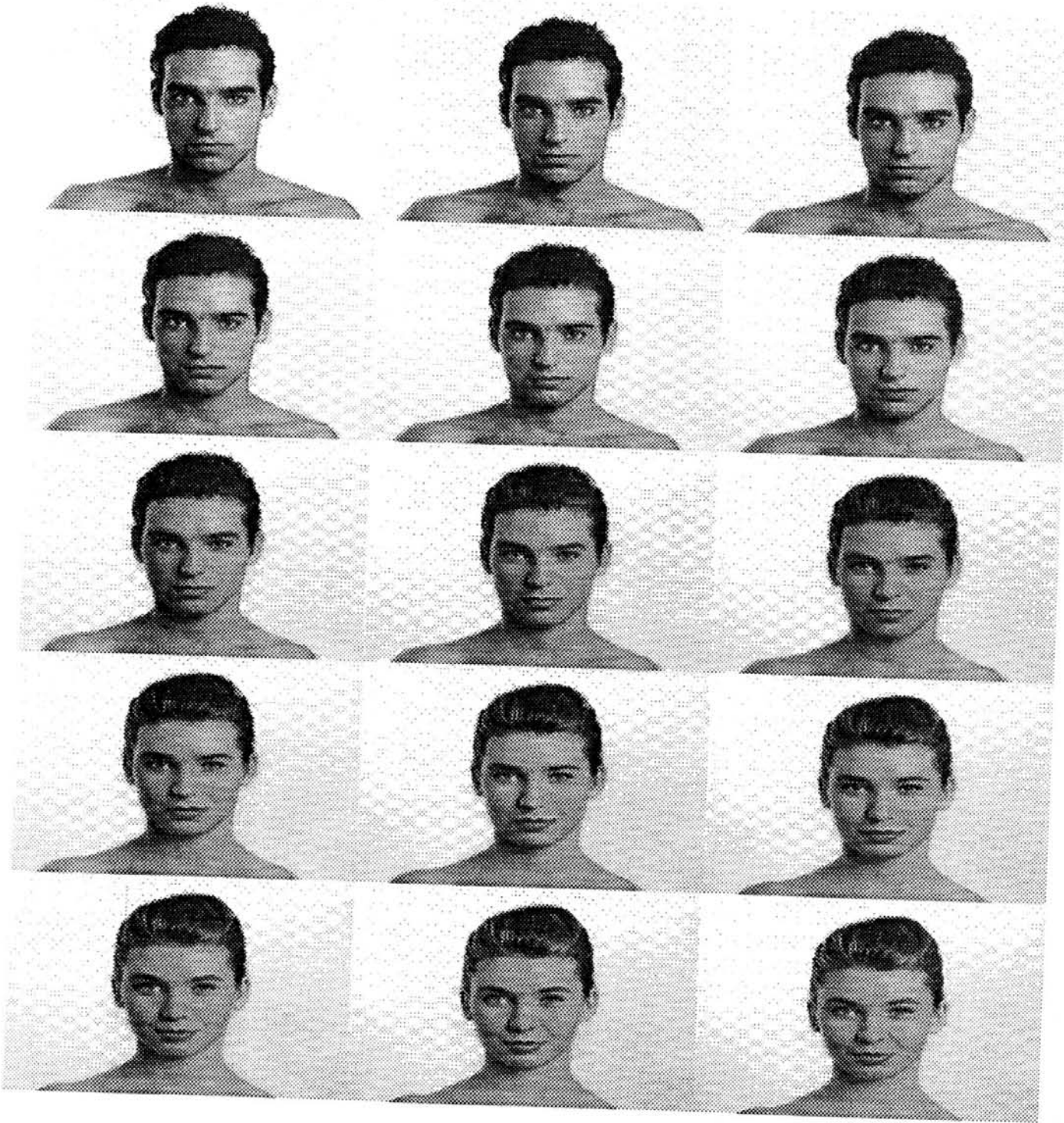


Figura 3.36: Seqüência de *morphing* entre duas imagens

3.8 Resumo

Este capítulo descreveu os procedimentos envolvidos durante uma Metamorfose Digital de Imagens (*Morphing*), bem como os métodos escolhidos para estudo.

Como exposto esses métodos apresentam características distintas para

- transformações espaciais,
- demarcação de correspondências e
- reamostragem,

as quais foram apresentadas, discutidas e alguns resultados individuais obtidos introduzidos, originando uma representação conceitual individual para cada um dos métodos, representadas pelas figuras 3.37 e 3.38.

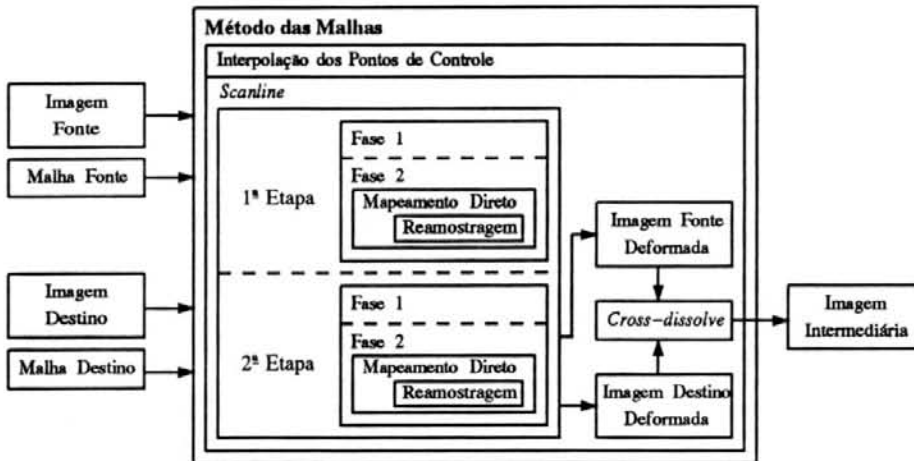


Figura 3.37: Representação conceitual para o Método das Malhas

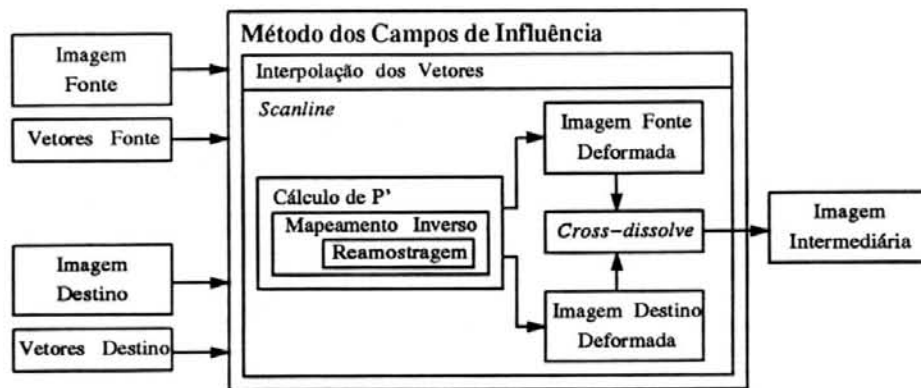


Figura 3.38: Representação conceitual para o Método dos Campos de Influência

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos, através do sistema de teste implementado, para o Método das Malhas e para o Método dos Campos de Influência ¹, bem como uma análise dos mesmos.

Os resultados apresentados dizem respeito ao tempo de processamento gasto na elaboração das imagens intermediárias, para diferentes resoluções e número de primitivas de controle.

Por primitivas de controle entende-se os dispositivos básicos utilizados para determinação de correspondências entre as imagens, o que para o primeiro método estudado é representado pelos pontos de controle, enquanto que para o segundo são empregados vetores.

Também são estabelecidas análises do consumo de memória e tempo gasto para determinação das correspondências entre as imagens fonte e destino.

Por fim é realizado um quadro comparativo entre os métodos, onde salienta-se vantagens e desvantagens da utilização de cada um.

É importante salientar que tanto para o Método das Malhas, quanto para o Método dos Campos de Influência, as imagens utilizadas para cálculo dos tempos de processamento possuem iguais resoluções horizontais e verticais. Este procedimento foi utilizado para simplificar a análise dos resultados, uma vez que elimina a necessidade de identificá-las separadamente. Também, no caso do Método

¹Os resultados foram obtidos em uma estação de trabalho SiliconGraphics Iris Crimson Elan.

das Malhas, o número de pontos de controle horizontais é igual ao número de pontos verticais.

4.2 Análise do Método das Malhas

Esta seção apresenta-se dividida em três subseções. A primeira apresenta uma análise do algoritmo de *Morphing* no que diz respeito a tempo de processamento. A segunda apresenta o consumo de memória do Método das Malhas e a terceira analisa o método com relação ao tempo gasto para atribuição de correspondências.

4.2.1 Análise do Tempo de Processamento

Aplicando-se o algoritmo do Método das Malhas para elaboração de imagens intermediárias obteve-se a tabela 4.1. Nela encontram-se distribuídos os tempos de processamento, em segundos, envolvidos no cálculo de imagens deformadas a partir da imagem fonte, quando da variação da resolução, em *pixels*, e do número de pontos de controle.

Observa-se através da tabela 4.1 que o tempo gasto na elaboração das imagens aumenta consideravelmente quando a resolução das imagens fonte e destino é modificada e este aumento representa um acréscimo não tão expressivo quando da alteração do número de pontos de controle das malhas de correspondência, para uma mesma resolução de imagens.

O fenômeno descrito acima pode ser melhor entendido através da figura 4.1, que representa o aumento do tempo de processamento representado na tabela 4.1.

Concentrando a análise na variação do tempo de processamento com relação à resolução das imagens, a figura 4.2 é obtida. Nela apresentam-se dis-

Tabela 4.1: Variação do tempo de processamento para deformação de imagens

Resolução	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Malha	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
05x05	0,169	0,650	1,500	2,639	4,310	5,899	8,079	10,580	13,340	16,539
10x10	0,179	0,680	1,580	2,680	4,130	5,980	8,090	10,589	13,449	16,679
15x15	0,200	0,700	1,539	2,699	4,180	5,980	8,840	10,639	13,620	16,709
20x20	0,210	0,710	1,550	2,760	4,250	6,100	8,250	10,789	13,740	17,439
25x25	0,220	0,740	1,580	2,799	4,490	6,130	8,420	11,289	14,230	16,950
30x30	0,240	0,770	1,630	2,840	4,350	6,240	8,529	11,329	13,840	17,100
35x35	0,260	0,980	1,660	2,920	4,420	6,340	8,530	11,019	13,910	17,169
40x40	0,279	0,840	1,830	2,970	4,610	6,419	8,830	11,150	14,050	17,360
45x45	0,299	0,870	1,750	2,979	4,519	6,460	8,660	11,289	14,149	17,460
50x50	0,320	0,909	1,789	3,029	4,620	6,539	8,750	11,380	14,310	17,570

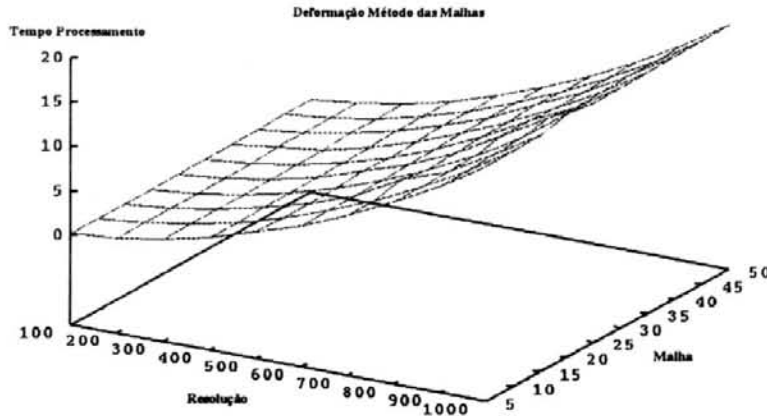


Figura 4.1: Variação resolução x malha x tempo de processamento

postos os tempos envolvidos nos cálculos das imagens deformadas para diferentes resoluções.

Com base nos dados, na análise do algoritmo e nos gráficos traçados conclui-se que o método, com relação ao aumento de resolução de imagens, apresenta desempenho

$$O(R^2)$$

onde R representa a resolução das imagens fonte e destino.

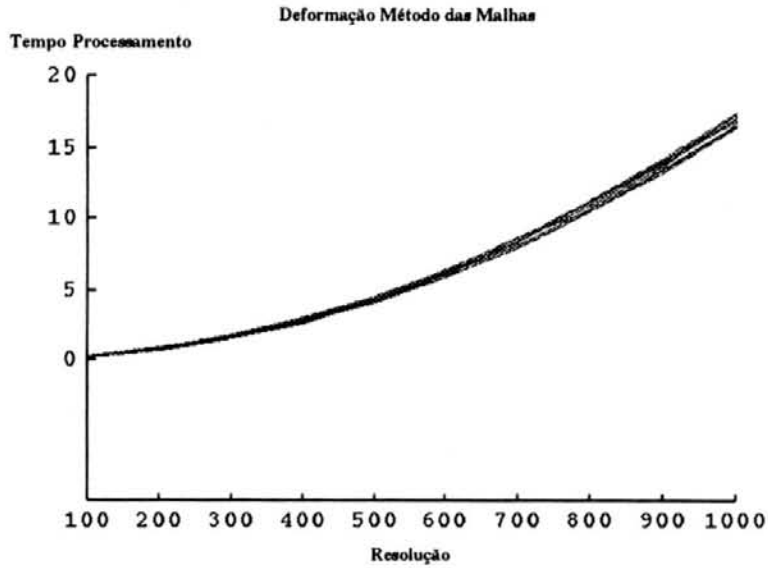


Figura 4.2: Variação resolução x tempo de processamento

Para confirmar a análise, o gráfico bilogarítmico da função foi elaborado e a figura 4.3 obtida. Nela observa-se que a tendência do gráfico é um conjunto de retas, o que confirma a complexidade encontrada inicialmente pelo estudo do algoritmo.

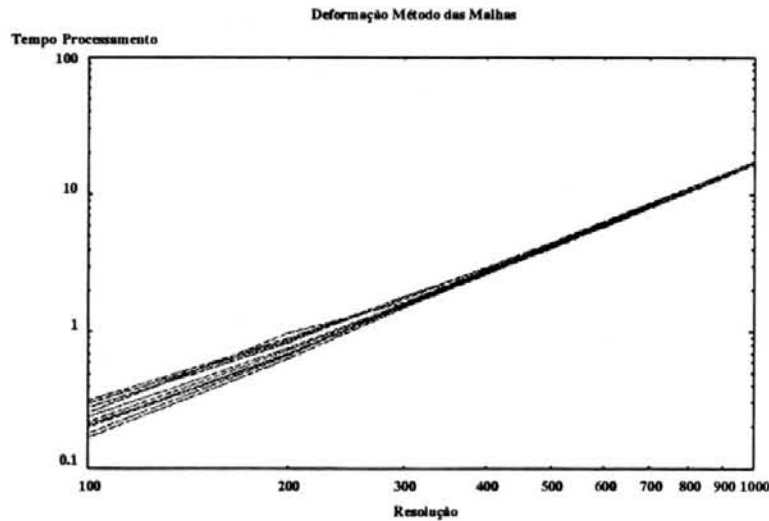


Figura 4.3: Variação bilogarítmica resolução x tempo de processamento

Também observa-se, na figura 4.3, que variações ocorrem e, por essa razão, a expressão tendência foi empregada. Essas variações ocorrem devido a limitações impostas pelo *hardware* utilizado para testes, uma vez que a variação do tempo de processamento é muito pequena e o processo sofre escalonamento.

Com relação à variação das malhas de correspondências, o desempenho

$$O(M^2)$$

onde M representa a variação das malhas, foi inicialmente encontrado. Uma análise mais cuidadosa com a utilização de gráficos, mostrou que havia outros detalhes a considerar.

Foi observado que, à medida que a resolução aumentava, as curvas dos gráficos das variações das malhas também sofriam modificações em seu formato. Deste ponto, partiu-se para uma reavaliação das rotinas envolvidas no cálculo das imagens e verificou-se que realmente o cálculo das malhas, em determinados pontos, valia-se da resolução das imagens para construção das funções de mapeamento, dando origem a um desempenho denotado por

$$O(M^2 + M.R)$$

onde M é a variação das malhas e R representa a resolução das imagens.

Os gráficos das variações do tempo de processamento com relação ao aumento das dimensões das malhas podem ser visualizados através das figuras 4.4 e 4.5, sendo que o segundo apresenta a variação bilogarítmica do primeiro.

Da mesma forma que para as resoluções, para a variação das malhas, também foram encontradas variações no comportamento dos tempos de processamento, e estas podem ser identificadas na tabela, e devem-se às restrições impostas pelo sistema computacional utilizado para testes.

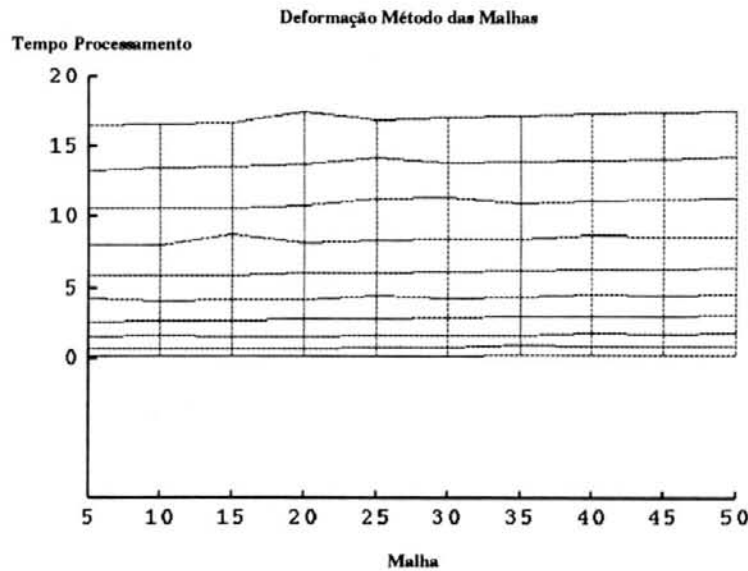


Figura 4.4: Variação malha x tempo de processamento

Baseado nos tempos referidos acima, bem como nos desempenhos dos algoritmos e no conteúdo exposto no capítulo 3, resta, para o Método das Malhas, analisar o tempo de processamento gasto no processo de *Morphing*.

Como visto, o processo de *Morphing* emprega a deformação de imagens duas vezes. Uma para tornar a imagem fonte compatível com os contornos da imagem destino e outra na operação inversa, isto é, tornar a imagem destino compatível com os contornos da imagem fonte. Portanto, é presumível que o tempo de processamento seja no mínimo duas vezes maior que para o processo de deformação de imagens.

A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para diferentes resoluções e primitivas de controle, para o efeito de *Morphing*.

Através da tabela 4.2 também foi possível elaborar os gráficos apresentados pelas figuras 4.6 e 4.7 que representam a variação de tempo de processamento com relação à resolução e às malhas de correspondências, respectivamente.

Da observação dessas figuras, da tabela e do algoritmo descrito no capítulo 3 chega-se à conclusão que o efeito de *Morphing* possui desempenhos iguais aos

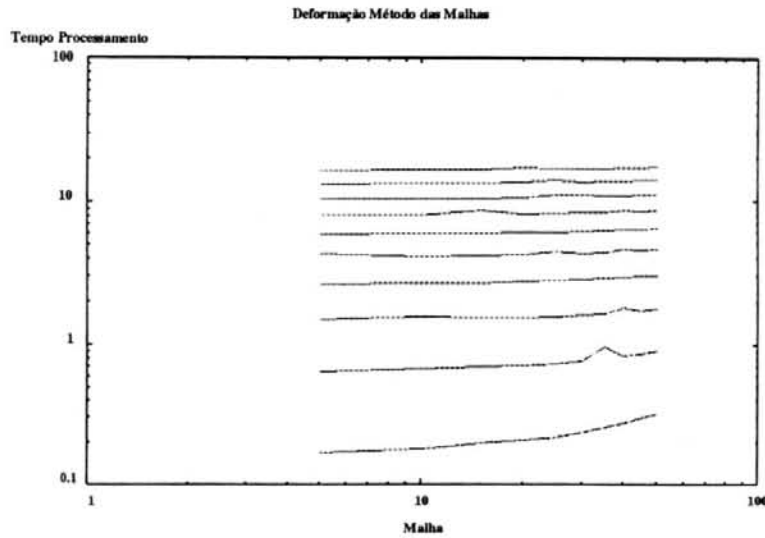


Figura 4.5: Variação bilogarítmica malha x tempo de processamento

Tabela 4.2: Variação do tempo de processamento para *morphing* de imagens

Resolução	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Malha	x 100	x 200	x 300	x 400	x 500	x 600	x 700	x 800	x 900	x 1000
05x05	0,350	1,339	3,060	5,389	8,490	12,070	16,300	21,700	26,830	33,230
10x10	0,370	1,389	3,190	5,449	8,500	12,580	16,289	21,689	27,000	33,350
15x15	0,419	1,420	3,130	5,579	8,610	12,159	17,600	21,889	27,349	33,900
20x20	0,409	1,450	3,159	5,810	8,480	12,689	16,670	21,819	28,220	34,240
25x25	0,450	1,500	3,220	5,850	8,820	12,350	16,819	22,250	28,190	33,839
30x30	0,470	1,560	3,290	5,689	8,709	12,599	17,500	22,259	27,779	35,080
35x35	0,500	1,780	3,380	5,789	8,750	13,009	17,069	22,159	27,870	34,960
40x40	0,539	1,680	3,539	5,880	9,110	12,790	17,909	22,469	28,089	34,580
45x45	0,579	1,729	3,540	5,920	9,080	12,929	17,349	22,440	28,310	35,880
50x50	0,620	1,790	3,669	6,049	9,199	13,270	17,519	22,769	28,609	35,350

do efeito de deformação e o tempo envolvido no processo de cálculo é superior ao dobro do encontrado anteriormente no processo de *Warping*.

Esse acréscimo de tempo deve-se à adição da etapa de *cross-dissolve*, a qual não ocorre nos processos de deformação de imagens e aumenta o tempo total. Esta adição de tempo corresponde ao tempo gasto para se percorrer toda a imagem realizando a fusão e, portanto, é da ordem de

$$O(R^2)$$

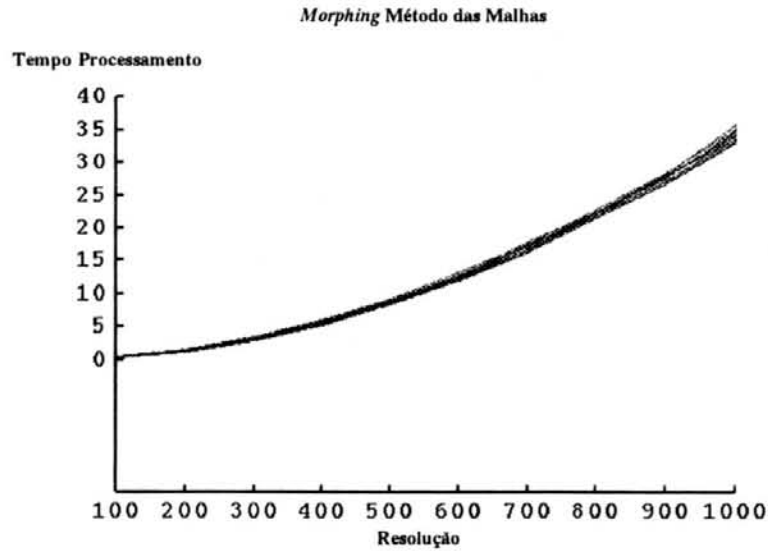


Figura 4.6: Variação resolução x tempo de processamento

onde R representa a resolução.

Para uma mesma resolução, o tempo de *cross-dissolve* é fixo, não importando a variação das malhas.

Assim o tempo total utilizado para cálculo de *Morphing* pode ser definido por

$$TP_{morphing} = 2 \cdot TP_{deform.} + cross-dissolve$$

onde $TP_{morphing}$ é o tempo necessário para realização do processo de metamorfose entre imagens, $TP_{deform.}$ é o tempo envolvido no processo de deformação de imagens e *cross-dissolve* representa o tempo utilizado pelo processo de fusão de imagens.

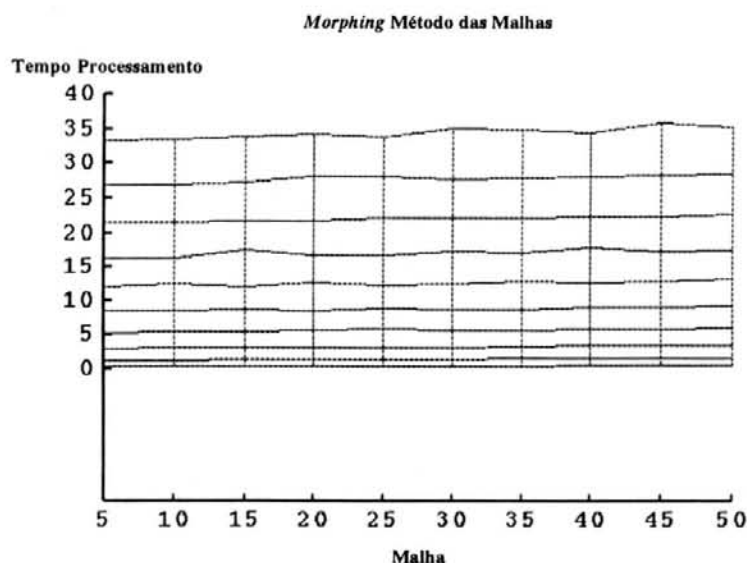


Figura 4.7: Variação malha x tempo de processamento

4.2.2 Análise do Consumo de Memória

O Método das Malhas necessita a alocação de memória para a imagem fonte, para a imagem destino, para as imagens deformadas ² e para a imagem intermediária.

A princípio essas áreas representam o consumo total de memória necessário para armazenamento das imagens, porém uma análise dos procedimentos envolvidos no cálculo das imagens deformadas mostra que entre a 1^a e a 2^a etapas do método existe a necessidade de um *buffer* adicional que armazena a imagem com deformações horizontais e que é utilizado para a realização das deformações verticais.

Os *buffers* de imagem devem possuir tamanho suficiente para armazenar as componentes *RGB* que compõem a cor de cada *pixel*. Como para um sistema *TRUE COLOR* ³ a variação não passa de 256 níveis por canal de imagem, cada componente pode ser armazenada em 1 *byte*.

²Não existe necessidade de se alocar espaço de memória para as imagens deformadas, em uma operação de deformação, pois a imagem intermediária é utilizada.

³Um sistema é dito *TRUE COLOR* quando permite representar uma quantidade de cores equivalente a 2^{24} . Esta quantidade permite 256 variações para cada componente *RGB*.

Assim o tamanho dos *buffers* pode ser calculado por

$$Tam_{buffer} = 3 \cdot R^2$$

onde Tam_{buffer} representa o tamanho em *bytes* necessário para armazenar uma imagem, R é a resolução da imagem e a constante 3 indica o número de *bytes* mínimo para representar as componentes *RGB*.

Também são empregados pela rotina de cálculo, vetores para armazenamento temporário das funções de mapeamento.

Esses vetores possuem tamanho proporcional à resolução das imagens e armazenam os ponderadores utilizados para o cálculo das deformações. São definidos como variáveis em ponto flutuante e expressos por

$$Tam_{vet} = R \cdot tamanho_{pf}$$

onde Tam_{vet} representa o tamanho em *bytes* dos vetores, R é a resolução da imagem e $tamanho_{pf}$ é o tamanho em *bytes* para variáveis em ponto flutuante.

Quanto às malhas de correspondências é necessário alocar memória para a malha fonte, a malha destino e a malha intermediária⁴. Porém uma análise mais aprofundada do algoritmo mostra que são empregadas duas tabelas para armazenamento temporário das coordenadas das malhas para todas as linhas/colunas das imagens. Estas tabelas resultam do cálculo das Fases 1 das duas etapas do Método das Malhas, vide 3.5.1.1 e 3.5.2.1.

⁴A malha intermediária é utilizada para armazenar as coordenadas obtidas através da interpolação entre as coordenadas das malhas fonte e destino.

A área alocada para as malhas de correspondências pode ser determinada através de

$$Tam_{malha} = M^2 \cdot tamanho_{pf}$$

onde Tam_{malha} é a área em *bytes* necessária para armazenamento das malhas, M é a dimensão das malhas e $tamanho_{pf}$ é o tamanho em *bytes* para variáveis em ponto flutuante.

As tabelas necessitam de uma área estimada por

$$Tam_{tab} = R \cdot M \cdot tamanho_{fp}$$

onde Tam_{tab} é o tamanho em *bytes* das tabelas para curvas, R é a resolução das imagens, M representa a dimensão das malhas e $tamanho_{fp}$ é o tamanho das variáveis em ponto flutuante.

Uma vez determinadas as áreas das malhas de correspondências, necessárias para o cálculo das funções de mapeamento, e a área das imagens, chega-se à determinação do consumo de memória do Método das Malhas que é dado por

$$Mem_{total} = 4 \cdot Tam_{buffer} + 7 \cdot Tam_{vet} + 3 \cdot Tam_{malha} + 2 \cdot Tam_{tab}$$

para o efeito de *Warping*, ou

$$Mem_{total} = 6 \cdot Tam_{buffer} + 7 \cdot Tam_{vet} + 3 \cdot Tam_{malha} + 2 \cdot Tam_{tab}$$

para o efeito de *Morphing*.

4.2.3 Análise da Determinação de Correspondências

A análise do tempo necessário para se estabelecer as correspondências entre as imagens é um tanto subjetiva, uma vez que baseia-se na experiência do usuário. Porém, a fim de propiciar dados para estabelecer uma comparação entre os métodos, ela será abordada.

Como exemplo ilustrativo são utilizadas as imagens da figura 3.4. Sobre elas foram demarcadas as correspondências (vide figura 3.8) e o tempo necessário para essa demarcação cronometrado, gerando a tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tempo utilizado para determinação de correspondências

Resolução das Imagens	Dimensões da Malha	Tempo de Demarcação
500x350 <i>pixels</i>	25x25 pontos	90 minutos

O tempo de demarcação foi estimado através de uma média entre os tempos encontrados, sendo que para cada amostragem não ocorreram flutuações, sobre a média, superiores a 15 min.

Como visto, o tempo utilizado no processo de demarcação de correspondências pode variar de acordo com a experiência do usuário. Desta forma, o mesmo usuário determinará os tempos de demarcação para o Método dos Campos de Influência. Também é importante salientar que o conhecimento dos métodos, por parte do usuário, é o mesmo.

Pode-se concluir que o tempo gasto para determinação das correspondências entre as imagens fonte e destino é o gargalo do Método das Malhas e, se esta característica for melhorada, aumentará o desempenho do método.

4.3 Análise do Método dos Campos de Influência

Como na seção anterior, esta também apresenta-se dividida em três sub-seções que englobam as análises de

- tempo de processamento,
- consumo de memória e
- determinação de correspondências

para o Método dos Campos de Influência.

4.3.1 Análise do Tempo de Processamento

Ao utilizar o Método dos Campos de Influência para cálculo das imagens intermediárias para o efeito de deformação, obteve-se a tabela 4.4. Esta tabela apresenta o tempo gasto em processamento, expresso em segundos, ao se variar a resolução e o número de vetores empregados para atribuição de correspondências.

Tabela 4.4: Variação do tempo de processamento para deformação de imagens

Resolução	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Vetores	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
01	0,630	2,490	5,630	9,970	15,579	22,490	30,680	40,000	50,470	62,279
04	2,370	9,470	21,360	37,930	59,259	85,399	116,309	151,840	192,380	237,090
07	4,120	16,480	37,130	65,970	103,090	148,509	202,220	264,060	334,069	412,570
10	5,870	23,460	52,819	93,860	146,670	211,279	287,649	375,649	475,329	586,830
13	7,610	30,430	68,509	121,759	190,269	274,049	373,100	487,409	616,579	761,230
16	9,360	37,409	84,200	149,650	233,850	336,909	458,539	598,870	759,030	935,639
19	11,130	44,429	100,009	177,769	277,779	400,080	544,649	711,550	900,269	1111,360
22	12,880	51,500	115,889	206,000	322,580	463,620	631,149	824,320	1043,160	1291,589
25	14,640	58,480	131,610	233,930	365,570	526,450	716,669	936,030	1184,549	1492,429
28	16,389	65,460	147,389	261,850	409,130	589,230	802,110	1047,600	1325,789	1636,810

Com base na tabela 4.4 observa-se que o aumento do tempo de processamento é maior quando da alteração da resolução da imagem do que quando do aumento do número de vetores.

Para entender essas variações a figura 4.8 foi elaborada e apresenta o gráfico de variação do tempo de processamento em função da resolução das imagens e do número de vetores empregados.

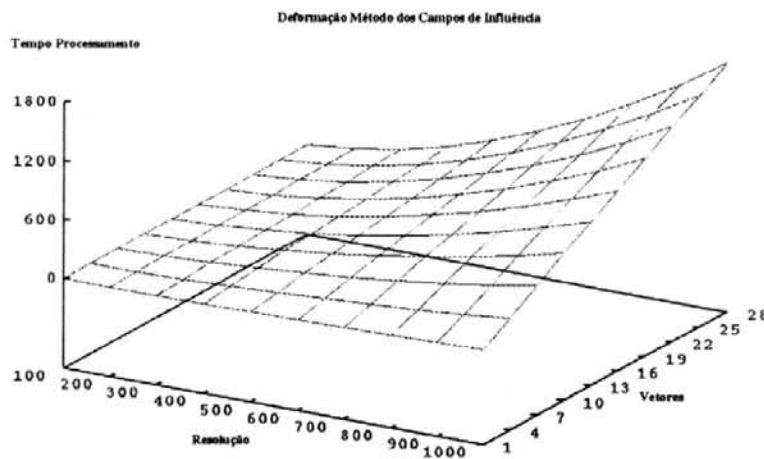


Figura 4.8: Variação resolução x vetores x tempo de processamento

Direcionando a análise para a variação do tempo de processamento em função da modificação da resolução das imagens, obteve-se o gráfico apresentado na figura 4.9. Nela observa-se que com o acréscimo de resolução o tempo necessário para cálculo aumenta exponencialmente.

Através da análise do algoritmo empregado pelo método chegou-se à hipótese de que o Método dos Campos de Influência possuía desempenho

$$O(R^2)$$

onde R representa a resolução das imagens.

Restava, baseado nos dados da tabela 4.4, comprovar essa hipótese. Assim, foi traçado o gráfico bilogarítmico das funções utilizadas na figura 4.9, e pode-se

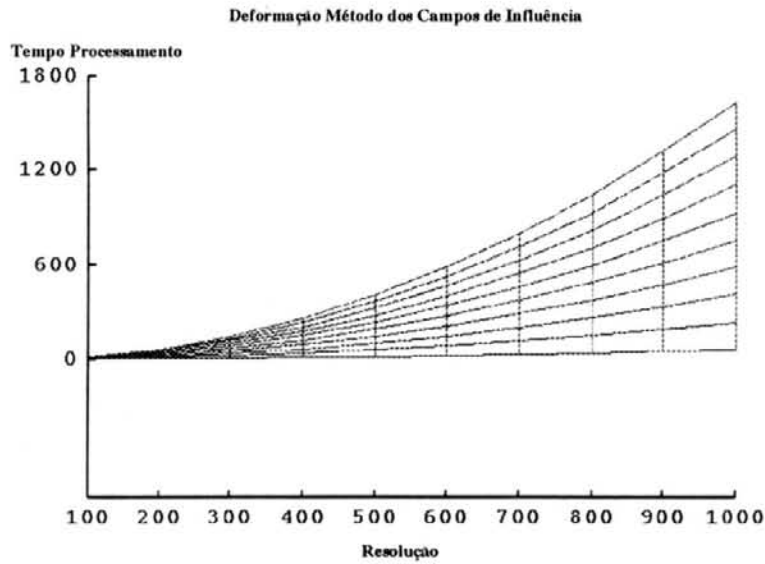


Figura 4.9: Variação resolução x tempo de processamento

chegar a uma confirmação da complexidade anteriormente encontrada. Esse gráfico pode ser visualizado na figura 4.10.

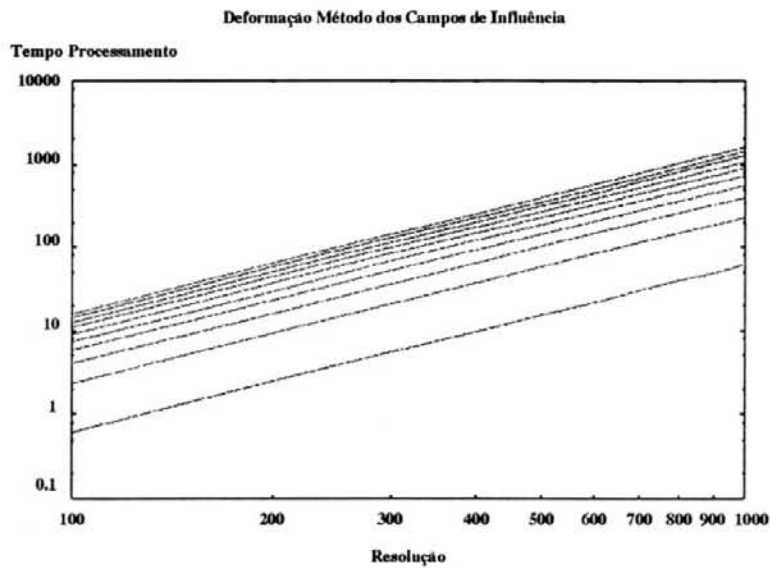


Figura 4.10: Variação bilogarítmica resolução x tempo de processamento

Quanto à variação do tempo de processamento em função número de vetores empregados, pode-se chegar à figura 4.11. Nela observa-se que a variação do tempo de processamento é proporcional à variação do número de vetores empregados.

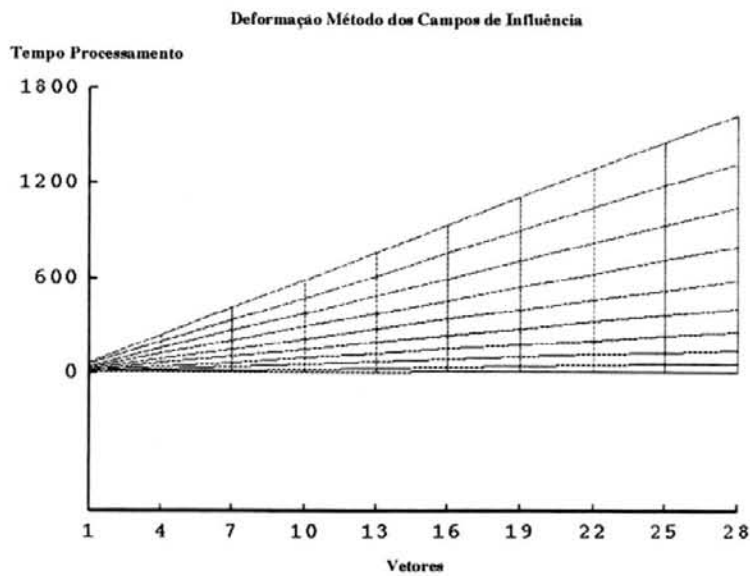


Figura 4.11: Variação vetores x tempo de processamento

Desta forma conclui-se que o acréscimo de tempo no processo de cálculo é linear e segue o acréscimo do número de vetores, sendo o desempenho denotado por

$$O(V)$$

onde V é o número de vetores empregados.

Para confirmar a análise, foi utilizado o gráfico bilogarítmico das funções utilizadas na figura 4.11 e obteve-se a figura 4.12, onde pode-se observar a linearidade do crescimento do tempo em função do acréscimo de vetores.

Pela análise do algoritmo e observação dos gráficos traçados, chega-se a conclusão que o desempenho do método pode ser expresso pela combinação dos desempenhos quanto a resolução e número de vetores e pode ser expresso por

$$O(R^2 \cdot V)$$

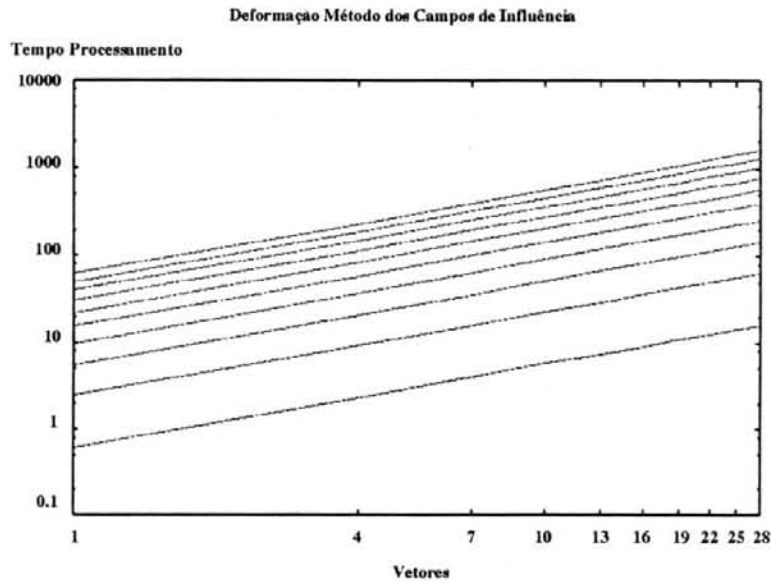


Figura 4.12: Variação bilogarítmica vetores x tempo de processamento

onde R representa resolução e V representa o número de vetores de correspondências.

Quanto ao tempo de processamento resta analisar, para o Método dos Campos de Influência, o efeito de *Morphing*.

Como visto no capítulo 3, os cálculos empregados na determinação do ponto de amostragem na imagem fonte devem ser efetuados para todos os pontos da imagem intermediária e, uma vez determinados, é realizada a atribuição do valor da cor encontrada. Na elaboração do cálculo da posição a ser amostrada, várias variáveis computadas são compartilhadas, tanto para o efeito de deformação quanto para o efeito de *Morphing*.

A diferença entre os processos está no cálculo das equações 3.6 e 3.10. Para o efeito de deformação, apenas é calculada a posição de amostragem na imagem fonte, enquanto que para o efeito de *Morphing* este cálculo também é efetuado sobre os pontos da imagem destino. Porém, como os valores encontrados podem ser compartilhados para a maior parte do processo o acréscimo de tempo não é tão significativo como o encontrado para o Método das Malhas.

Esse acréscimo de tempo pode ser observado na tabela 4.5, a qual apresenta os tempos de processamento, medidos em segundos, envolvidos no cálculo de *Morphing* entre imagens, para o Método dos Campos de Influência. Os tempos encontram-se dispostos conforme a variação da resolução das imagens e do número de vetores empregados.

Tabela 4.5: Variação do tempo de processamento para *morphing* de imagens

Resolução	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Vetores	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
01	0,719	2,919	6,580	11,700	18,310	26,320	35,849	46,740	59,100	73,009
04	2,650	10,569	23,799	42,309	66,120	95,180	129,580	169,169	214,069	264,159
07	4,529	18,149	40,860	72,630	113,519	163,439	222,490	290,710	367,670	453,820
10	6,450	25,810	58,089	103,250	161,370	232,350	316,269	413,030	522,720	645,240
13	8,370	33,470	75,320	133,880	209,230	301,269	410,090	535,670	677,809	836,709
16	10,279	41,060	92,389	164,279	256,950	369,579	503,090	657,150	831,529	1026,469
19	12,190	48,669	109,490	194,980	304,179	438,009	597,049	778,659	985,490	1216,549
22	14,099	56,279	126,580	225,029	351,639	506,380	689,360	900,220	1141,280	1406,529
25	16,000	63,859	143,679	255,389	399,090	574,720	782,280	1021,690	1293,080	1596,300
28	17,191	71,519	160,759	285,769	446,539	643,060	875,319	1143,189	1446,850	1786,149

Ainda para o efeito de *Morphing* deve-se considerar o tempo envolvido no processo de *cross-dissolve* que, como visto para o Método das Malhas, é da ordem

$$O(R^2)$$

onde R representa a resolução das imagens. Para uma mesma resolução o tempo de *cross-dissolve* é fixo, não importando a variação do número de vetores de correspondências.

Da observação da tabela 4.5 e do algoritmo exposto no capítulo 3, chega-se a constatação que o tempo de processamento envolvido no processo de metamorfose entre imagens pode ser definido por

$$TP_{morphing} = mor \cdot TP_{deform} + cross-dissolve$$

onde $TP_{morphing}$ é o tempo de processamento para o processo de *Morphing*, mor representa o incremento no tempo de processamento para o efeito de deformação, TP_{deform} é o tempo necessário para cálculo do efeito de *Warping* e *cross-dissolve* é o tempo utilizado pelo processo de fusão de imagens.

4.3.2 Análise do Consumo de Memória

Para o cálculo das imagens intermediárias, o Método dos Campos de Influência necessita alocar memória para a imagem fonte, para a destino, para as imagens deformadas e para a imagem intermediária. Do mesmo modo que para o Método das Malhas não existe necessidade de se alocar espaço de memória para as imagens deformadas, em uma operação de deformação, pois a imagem intermediária é utilizada.

Essas regiões representam o consumo total de memória para armazenamento de imagens.

Como visto na seção anterior, para se armazenar uma imagem em um sistema *TRUE COLOR* é necessário um *buffer* com tamanho denotado por

$$Tam_{buffer} = 3 \cdot R^2$$

onde Tam_{buffer} é o tamanho em *bytes* dos *buffers* para imagens, R representa a resolução das imagens e a constante 3 indica o número de *bytes* necessários para representar a cor.

A diferença na quantidade de memória com relação ao Método das Malhas reside no fato da utilização de mapeamento inverso, pois apenas são calculadas as posições de amostragem e esta operação não exige armazenamento temporário de imagens.

Quanto aos vetores, é necessário armazenar as coordenadas dos pontos extremos de cada um e, para tanto, a estrutura

$$vetor = \begin{cases} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{cases}$$

foi definida. Essa estrutura é utilizada para armazenamento dos vetores fonte, destino e intermediários ⁵.

Desta forma, a quantidade de memória necessária para os vetores de influência é dada por

$$Tam_{vet} = N \cdot tamanho_{vetor}$$

Tam_{vet} é o tamanho em *bytes* para armazenar os vetores de influência, N é o número de vetores empregados e $tamanho_{vetor}$ é o tamanho em *bytes* da estrutura *vetor*.

Uma vez determinadas as áreas necessárias para os vetores e os *buffers* de imagens, chega-se à determinação do consumo de memória do Método dos Campos de Influência, o qual pode ser expresso segundo

$$Mem_{total} = 3 \cdot Tam_{buffer} + 3 Tam_{vet}$$

para o efeito de *Warping*, onde as constantes representam o número de *buffers* para imagens e o número de *buffers* para vetores, respectivamente, ou

⁵Os vetores intermediários resultam do cálculo da interpolação entre os vetores fonte e destino.

$$Mem_{total} = 5 \cdot Tam_{buffer} + 3 Tam_{vet}$$

para o efeito de *Morphing*, onde o acréscimo dos *buffers* para imagens deve-se à adição dos *buffers* para as imagens deformadas.

4.3.3 Análise da Determinação de Correspondências

Como visto no Método das Malhas essa análise é subjetiva, pois baseia-se na experiência do usuário que estabelece as correspondências. Todavia, para efeito de comparação entre os métodos, é usado.

O exemplo utilizado para teste será o mesmo empregado pelo Método das Malhas, mudando apenas a forma como são realizadas as correspondências entre as imagens. A figura 3.23 apresenta os vetores demarcados sobre as imagens utilizadas, e o tempo gasto na determinação destas demarcações é apresentado na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Tempo utilizado para determinação de correspondências

Resolução das Imagens	Número de Vetores	Tempo de Demarcação
500x350 <i>pixels</i>	80 vetores	15 minutos

Da mesma forma que para o método anterior, o tempo foi estimado através de uma média entre os tempos encontrados, sendo que não foram constatados desvios superiores a 10 minutos sobre esta média.

Baseado no exposto, conclui-se que o tempo e a facilidade de atribuição de correspondências entre as imagens são os fatores que mais colaboram para a utilização do Método dos Campos de Influência. Pois o tempo de processamento é muito elevado.

4.3.4 Análise Comparativa entre os Métodos

Nesta seção é apresentado um quadro comparativo entre o Método das Malhas e o Método dos Campos de Influência.

Para tanto, é necessário introduzir o conceito de *bottleneck*. Esta definição se faz necessária, porque na tabela de comparações o termo será utilizado para indicar um dos problemas apresentados por um dos métodos.

Bottleneck é um problema presente em todos os métodos de deformação de imagens que empregam algoritmos baseados em dois passos [COS92]. Ele consiste na má formação da imagem final devido a uma distorção na imagem temporária utilizada pelos algoritmos.

Assim, quando o problema ocorre, não existe informação suficiente para o cálculo correto do 2º passo da deformação e este problema tem origem nos casos em que é necessária a realização de uma rotação acentuada na imagem.

Tendo introduzido o problema, resta realizar a comparação entre os métodos, a qual pode ser observada no quadro apresentado na figura 4.13.

Através da observação do quadro, nota-se que a união dos dois métodos, englobando as vantagens de cada um, pode dar origem a um método mais eficiente.

Este método híbrido foi mencionado no capítulo 3, utiliza primitivas de controle dos métodos estudados e é denominado “*Field Controlled Spline Mesh Warping*” [COS92].

Ele utiliza os vetores do Método dos Campos de Influência para deformar os pontos de controle das malhas do Método das Malhas. Desta forma, une a eficiência dos dois métodos apresentados neste trabalho e pode ser encontrado com uma maior abordagem em Costa [COS92].

	Método das Malhas	Método dos Campos de Influência
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidade de processamento • Controle local • Complexidade $O(R^2)$ • Facilidade na identificação e correção de erros • Não necessita recorte • Identificação visual das regiões onde ocorrerão as deformações 	<ul style="list-style-type: none"> • Não apresenta <i>Bottleneck</i> • Facilidade na atribuição de correspondências • Baixo consumo de memória • Transformações globais facilitadas • Não necessita acumuladores
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bottleneck</i> devido ao algoritmo de dois passos utilizado • Alto tempo para determinação das correspondências • Alto consumo de memória • <i>Foldover</i> • Necessita acumuladores 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa velocidade de processamento • Complexidade $O(R^2.V)$ • Fantasmas • Recorte • Necessidade de um processo para identificação de como o mapeamento foi realizado

Figura 4.13: Comparação entre os métodos de *Morphing*

4.4 Resumo

Neste capítulo foram apresentados resultados obtidos quando da utilização do Método das Malhas e do Método dos Campos de Influência, na obtenção de *Warping* e *Morphing* de imagens.

Esses resultados foram analisados e dizem respeito ao tempo de processamento necessário para elaboração das imagens intermediárias entre as imagens fonte e destino.

A análise mostrou que os métodos possuem complexidades, necessidade de memória e tempo para atribuição de correspondências diferentes.

Também foi elaborado um quadro comparativo, no qual pode-se organizar de forma esquematizada, as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos estudados.

Por fim foi sugerida, baseado no conteúdo exposto e no quadro elaborado, a unificação dos métodos, gerando um método híbrido que engloba as vantagens de

cada um. Este método híbrido encontra-se detalhado em maior profundidade no trabalho de Costa [COS92], no qual também são introduzidos resultados da aplicação do mesmo.

5 CONCLUSÕES

O mercado publicitário, em conjunto com o cinematográfico, vêm crescendo muito rapidamente e, para que esse crescimento continue, existe a necessidade de uma contínua renovação.

Essa renovação diz respeito a técnicas de efeitos especiais empregadas para atrair um maior número de clientes, para o mercado publicitário, e expectadores, para o mercado cinematográfico.

Assim, desde o momento em que esses mercados descobriram a Computação Gráfica, e os efeitos por ela proporcionados, ocorreu a união entre esses diversos ramos de atividades, que a princípio não possuíam relação, mas que em uma análise mais cuidadosa, se complementam.

Essas atividades são ditas complementares, porque

- os mercados publicitário e cinematográfico elaboram a criação artística de um efeito desejado, e
- a Computação Gráfica é capaz de transformar a idéia básica criada, em um efeito representado numericamente em um computador.

Dentre os efeitos criados, um dos que mais se destacou foi a interpolação entre imagens digitais [SOR92].

Essa técnica permite realizar uma metamorfose entre duas imagens distintas, produzindo uma seqüência de transição entre as imagens fonte e destino.

A seqüência de transição é obtida através de deslocamentos, que podem ocorrer de diversas formas, e uma operação de fusão entre imagens. Portanto, esses deslocamentos mereceram um estudo mais aprofundado.

O estudo objetivou a compreensão e análise de funcionamento dos métodos utilizados para realização de metamorfose entre imagens, sendo suas três principais metas:

- pesquisar os métodos existentes, bem como as estruturas utilizadas e seus funcionamentos;
- implementar um sistema de testes, a fim de gerar resultados de análise para os métodos escolhidos, e
- analisar os resultados obtidos pelo sistema, destacando o desempenho dos métodos e salientando as suas vantagens e desvantagens.

Tendo atingido o objetivo do trabalho, foi possível concluir que o tempo necessário para a geração das imagens não é tão significativo quanto o tempo gasto com a atribuição de correspondências e retoques nas imagens geradas, em especial para o Método das Malhas.

Por retoque entende-se pequenas edições que devem ser realizadas para melhorar as imagens intermediárias. Essas edições são necessárias quando, por exemplo, do aparecimento de características presentes na imagem destino e não na imagem fonte.

Como exemplo ilustrativo pode-se citar a metamorfose entre duas faces, vide figura 5.1 na qual a primeira possui cabelos curtos e a segunda cabelos compridos (franja). O aparecimento dos cabelos é uma etapa que deve ser tratada através da edição de todas as imagens geradas, o que consome um tempo considerável.

5.1 Futuras Extensões

O protótipo desenvolvido consta de uma versão simplificada de um sistema para elaboração de *Morphing*.



Figura 5.1: Edição de imagens

Ele é dito simplificado, pois extensões podem ser realizadas, a fim de torná-lo mais completo e flexível.

Dentre essas extensões pode-se citar

- *Morphing* entre Imagens em Movimento;
- Controle de Velocidade;
- Estabelecimento de Grupos de Primitivas de Controle e
- Paralelização e Vetorização dos Algoritmos,

as quais serão abordadas nas próximas seções.

5.1.1 *Morphing* entre Imagens em Movimento

O *Morphing* entre imagens em movimento torna o efeito de transformação ainda mais impressionante. Nele, ao contrário do método estático, as imagens fonte e destino variam ao longo da animação, tornando o processo uma interpolação bidirecional.

A figura 5.2 apresenta uma representação esquemática do processo de *Morphing* estático e *Morphing* em movimento.

O processo, como visto, possui uma interpolação das primitivas de controle em dois sentidos. O primeiro na horizontal, onde as primitivas são interpoladas para se adequarem às novas imagens fonte e destino, e o segundo na vertical, interpolando as imagens.

A seqüência de imagens fonte e destino pode ser conseguida pela digitalização, por exemplo, a cada 10 quadros [BEI92], de uma animação previamente gravada.

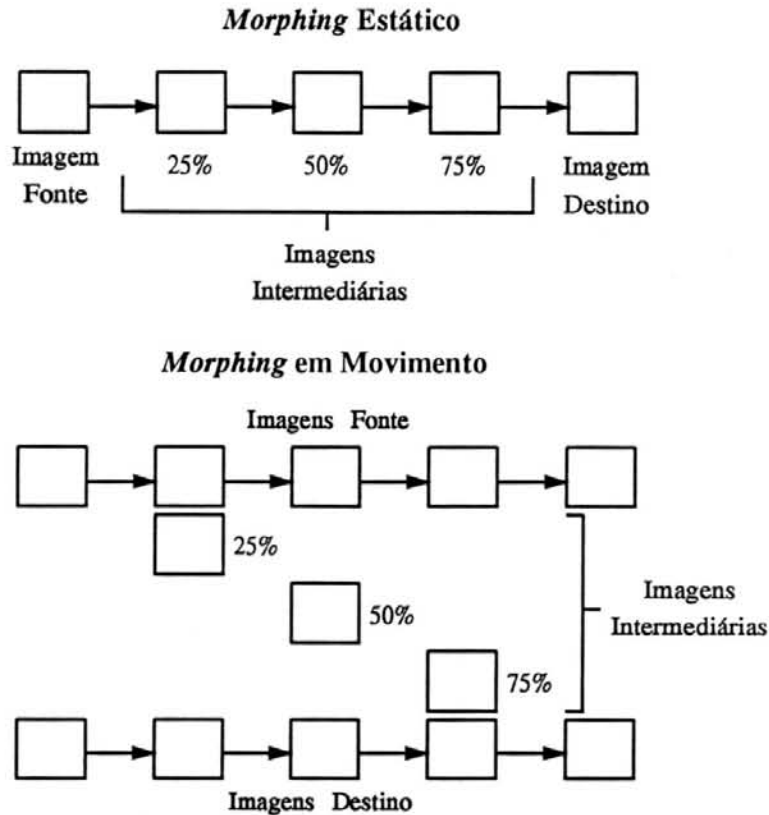


Figura 5.2 *Morphing* estático e em movimento

5.1.2 Controle de Velocidade

O controle das velocidades de interpolação de primitivas de controle e do processo de fusão de imagens constitui-se em uma poderosa ferramenta.

Através desse controle é possível determinar com que velocidades as imagens intermediárias vão perdendo as características da imagem fonte e adquirindo as da imagem destino. Sendo esse controle determinado pelos polinômios interpoladores utilizados.

No sistema implementado foi empregada uma interpolação linear entre as imagens. Assim, uma imagem com 50% do processo elaborado, possui exatamente 50% das características das imagens originais.

Em uma extensão ao trabalho pode-se deixar para o usuário determinar essas velocidades, o que pode ser realizado através de uma interface como a apresentada na figura 5.3, na qual cada ponto de controle do polinômio representa um quadro da animação a ser gerada e, a curva formada, as velocidades de fusão de imagens e interpolação de primitivas de controle.

Através dessa técnica é possível realizar acelerações e desacelerações na transformação, tornando o efeito mais realista.

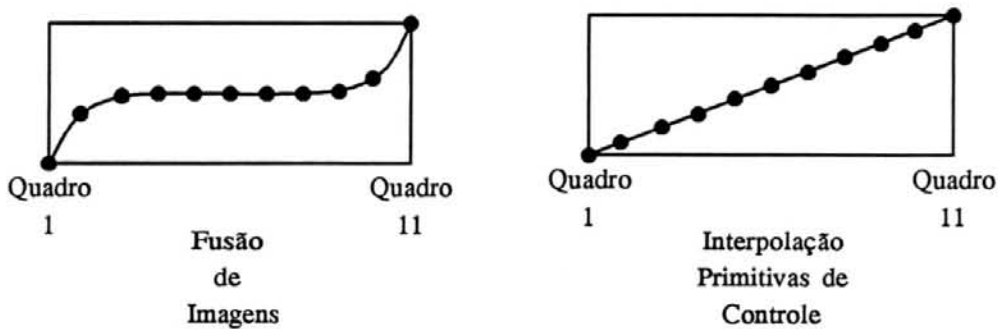


Figura 5.3 Controle de velocidades

5.1.3 Grupos de Primitivas

O sistema implementado, como visto na seção anterior, realiza a interpolação entre todas as primitivas de controle de forma linear, porém existe a possibilidade de se empregar um polinômio interpolador para cada primitiva, ou para conjuntos destas.

Dessa forma, é possível obter deslocamentos com velocidades diferentes para diversas porções das imagens, o que melhora o efeito final, pois o observador não sabe em qual região da imagem o processo ocorrerá e, por esse motivo, imperfeições na interpolação não são tão facilmente percebidas.

Assim, é possível que, no caso do exemplo da figura 3.5, as pessoas se transformem nas letras da palavra criação com velocidades diferentes. Por exemplo a

letra “O” transforma-se primeiro que a letra “C” que por sua vez sofre a metamorfose antes da letra “Ç”.

Essa extensão foi prevista nas estruturas de dados, mas não implementada, o que facilita uma futura alteração.

5.1.4 Paralelização e Vetorização dos Algoritmos

A paralelização e vetorização dos algoritmos de *Morphing* é uma extensão ao trabalho útil para minimizar o tempo gasto na geração das imagens intermediárias.

Através dessa técnica é possível realizar os cálculos em uma máquina multiprocessada e vetorial, já que as operações, em sua maioria, constam da aplicação de transformações sobre vetores.

Para uma seqüência de *Morphing* com um número reduzido de quadros intermediários e resolução de imagem, os resultados obtidos nas estações *SiliconGraphics* são satisfatórios. Porém, quando a resolução das imagens aumenta, o tempo de processamento é ampliado segundo $O(R^2)$, como visto na capítulo 4, justificando uma melhoria no desempenho dos métodos, para esses casos.

Uma das formas encontradas para realizar essa melhoria é a utilização de recursos de paralelismo e vetorização.

BIBLIOGRAFIA

- [AND76] ANDREWS, H. C.; PATTERSON III, C. L. Digital Interpolation of Discrete Images. **IEEE Transaction on Computers**, New York, v.C-25, n.2, p.196-202, Feb. 1976.
- [BEI92] BEIER, T.; NEELY, S. Feature-Based Image Metamorphosis. **In: SIGGRAPH 92 CONFERENCE**, July, 1992. **Proceedings...** New York: ACM, 1992. p.35-42.
- [BEN91] BENNIS, C.; VÉZIEN, J.; IGLÉSIAS, G. **In: SIGGRAPH 91 CONFERENCE**, July, 1991. **Proceedings...** New York: ACM, 1991. p.237-246.
- [COS92] COSTA, B.; DARSA, L.; GOMES, J. M. Image Metamorphosis. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS**, 5., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SIBGRAPI, 1992. 339p. p.19-27.
- [DIP85] DIPPE, M. A. Z.; WOLD, E. H. Antialiasing Through Stochastic Sampling. **In: SIGGRAPH 85 CONFERENCE**, July, 1985. **Proceedings...** New York: ACM, 1985. p.69-78.
- [FOL90] FOLEY, J. D. *et al.* **Computer Graphics: Principles and Practice**, 2.ed. New York: Addison Wesley, 1990. 1174p.
- [HAL92] HALL, V. **Introduction to Morphing**. Perth, Western Australia, Curtin University of Technology, 1992. (Graduation Project).
- [HEC86] HECKBERT, P. Survey of Texture Mapping. **IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, CA, v.6, n.11, p.56-67, Nov. 1986.

- [HEC89] HECKBERT, P. **Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping**. Berkeley: Dept. of EECS - University of California at Berkeley, 1989. (Master Thesis).
- [KOC84] KOCHANEK, D. H. U.; BARTELS, R. H. Interpolating Splines with Local Tension, Continuity, and Bias Control. In: SIGGRAPH 84 CONFERENCE, July, 1984. **Proceedings...** New York: ACM, 1984. p.33-41.
- [MIT87] MITCHELL, D. P. Generating Antialiased Images at Low Sampling Densities. In: SIGGRAPH 87 CONFERENCE, July, 1987. **Proceedings...** New York: ACM, 1987. p.65-72.
- [MOR85] MORTENSON, M. E. **Geometric Modeling** New York: John Wiley, 1985. 763p.
- [NAG83] NAGY, G. Optical Scanning Digitizers. **Computer**, Los Alamitos, CA, v.16, n.5, p.13-24, May. 1983.
- [OLI91] OLIVEIRA NETO, M. M. **Um Algoritmo para Interpolação de Formas entre Objetos Modelados por Superfícies Spline**. Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1991. 132p. (Dissertação de Mestrado).
- [OKA87] OKA, M.; TSUTSUI, K.; OHBA, A. *et al.* In: SIGGRAPH 87 CONFERENCE, July, 1987. **Proceedings...** New York: ACM, 1987. p.181-188.
- [PDI92] *Pacific Data Images (PDI)*. Publicações internas.
- [PIN92] PINHEIRO, R. V. **Aspectos de Implementação e Análise de Superfícies COONS**. Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1992. 64p. (Trabalho Individual, 271).

- [POR84] PORTER, T.; T. Duff. Compositing Digital Images. **In: SIGGRAPH 84 CONFERENCE**, July, 1984. **Proceedings...** New York: ACM, 1984. p.253-259.
- [SCH86] SCHREIBER, W. F. **Fundamentals of Eletronic Imaging Systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [SMI87] SMITH, A. R. Planar 2-Pass Texture Mapping and Warping.. **In: SIGGRAPH 87 CONFERENCE**, July, 1987. **Proceedings...** New York: ACM, 1987. p.263-272.
- [SMY90] SMYTHE, D. B. **A Two-Pass Mesh Warping Algorithm for Object Transformation and Image Interpolation**. [S.L.]: Lucasfilm, Computer Graphics Department, 1984 (ILM Technical Memo #1030).
- [SOR92] SORENSEN, P. Morphing Magic. **Computer Graphics World**, Pennwell, OK, v.15, n.1, p.37-42, Jan. 1992.
- [WAL91] WALTER, M. **A Obtenção de Texturas na Síntese de Imagens Realísticas num Ambiente Limitado**. Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1991. 150p. (Dissertação de Mestrado).
- [WOL90] WOLBERG, G. **Digital Image Warping**. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1990. 318p.



*Estudo e Análise sobre Métodos de Interpolação
de Imagens Bidimensionais.*

Dissertação apresentada aos Senhores:

Carla Maria Dal Sasso Freitas

Profa. Dra. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Clésio Luis Tozzi

Prof. Dr. Clésio Luis Tozzi (UNICAMP)

⁰ Examinador enviou parecer por escrito.

Prof. Dr. Ricardo Augusto da Luz Reis

Vista e permitida a impressão.

Porto Alegre, 08/12/95.

Anatolio Laschuk

Prof. Anatólio Laschuk,
Orientador.

José Palazzo Moreira de Oliveira

Prof. Dr. José Palazzo Moreira de Oliveira,
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Ciência da Computação.