

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-6346-TDI/597

**UMA ABORDAGEM MORFOLÓGICA PARA CASAMENTO
DE PADRÕES**

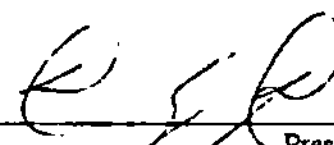
Sergio Donizete Faria

Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, orientada pelo Dr. Gerald Jean Francis Banon, aprovada em fevereiro de 1997.

**INPE
São José dos Campos
Fevereiro de 1997**


Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Computação Aplicada

Dra. Sandra Aparecida Sandri



Presidente

Dr. Gerald Jean Francis Banon



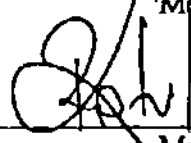
Orientador

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca

Dr. Roberto de Alencar Lotufo



Membro da Banca
Convidado

Candidato: Sérgio Donizete Faria

São José dos Campos, 03 de fevereiro de 1997

Aos meus pais

JUVERSINO e MARIA APARECIDA,

ao “meu FAMILIÃO”,

e ao Dr. Gerald Jean Francis Banon.

AGRADECIMENTOS

E meu muitíssimo obrigado vai para:

Dr. Banon, o “FAMILIÃO”, Maycira, Lúbia (Rúbia?), Júlio Hasegawa e família, Marisa (Marisoca), Luciano, Tatiana (Loira), Carlão (Caxalote), Marília (Marily), Regina, Ronald (Bus), Emerson e Rose, Lucy, Silvana, João Carlos (JC), Ana Lúcia, Adriana “da” Cruz, Ana Rosa (Xu), Claudia (Robbi), Fátima (Gorducha), Claus (Gorducho), Cristina, Adriana (Tanaka), Paulinho (natação), Nilton Imai, CAPES, INPE, funcionários do Serviço de Biblioteca do INPE, Grisel, Ritinha, Pantoja, Márcia, Marina e família, Coordenação do Curso de Computação Aplicada, “all” DPI, Marcia Marini, Marcelo e Mônica, Luciana, Professores do Curso de Computação Aplicada: por me orientar, me incentivar, me acolher; pela amizade, inspiração, ajuda e prestatividade; enfim, por existirem e assim tornarem possível este trabalho.

RESUMO

Nesta dissertação é apresentada uma representação morfológica para o casamento de padrões em imagens em níveis de cinza. Esta representação é dada pela composição do Operador de Casamento de Padrões com o Operador de Localização do Máximo Global, a qual pode ser expressa em termos das seguintes classes de operadores elementares da Morfologia Matemática: dilatações, erosões e anti-dilatações. Com base nesta representação é proposto um método para casamento de padrões em imagens em níveis de cinza, o qual é implementado no sistema Khoros. Alguns experimentos com este método utilizando imagens digitais (TM/Landsat e fotografias aéreas) são apresentados.

MORPHOLOGICAL APPROACH FOR TEMPLATE MATCHING

ABSTRACT

In this work, a morphological representation for template matching in grayscale images is presented. This representation is obtained through the composition of the Pattern Matching Operator with the Operator for Global Maximum Gray-Level Location, which can be expressed in terms of the following classes of Mathematical Morphology elementary operators: dilations, erosions and anti-dilations. Based on this representation a method for matching in grayscale images is proposed and implemented on the Khoros system. Finally, some experiments using this method are presented for digital images (TM/Landsat and aerial photography).

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações Gerais	1
1.2 – Objetivo da Dissertação	3
1.3 – Estrutura da Dissertação	3
CAPÍTULO 2 – CASAMENTO DE PADRÕES	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Casamento de Imagens ou de Padrões	5
2.2.1 – Casamento de Sinais (ou Casamento Baseado em Área)	7
2.2.2 – Casamento de Feições (ou Casamento Baseado em Feições)	10
2.2.3 – Casamento Relacional (ou Estrutural)	11
CAPÍTULO 3 – OPERADORES ELEMENTARES DA MORFOLOGIA MATEMÁTICA	13
3.1 – Introdução	13
3.2 – Algumas Definições	14
3.3 – Operadores Elementares Morfológicos	15
3.3.1 – Definição Axiomática dos Operadores Elementares	16
3.3.2 – Caracterização dos Operadores Elementares Sobre Uma Cadeia Limitada	18
3.3.2.1 – Exemplos de Operadores Elementares	19
CAPÍTULO 4 – OPERADORES DE CASAMENTO DE PADRÕES	23
4.1 – Introdução	23
4.2 – Definições Básicas	24
4.3 – Representação Morfológica do Operador de Casamento de Padrões	25
4.3.1 – Definição de Alguns Operadores Elementares da Morfologia Matemática	26
4.3.2 – Operadores de Casamento de Padrões e de Casamento Inexato	28
4.3.3 – Operador de Localização do Máximo Global	30
4.3.4 – Composição do Operador de Localização do Máximo Global com o Operador de Casamento de Padrões	32
4.3.5 – Exemplo de Casamento de Padrões em Imagens em Níveis de Cinza Utilizando o Operador Morfológico de Casamento de Padrões	33
4.3.5.1 – Seleção de Padrões Candidatos ao Casamento	35
4.3.5.2 – Geração das Imagens Padrões	36
4.3.5.3 – Aplicação do Operador Morfológico de Casamento de Padrões para Encontrar Correspondências	38
4.4 – Método da Soma das Diferenças Absolutas	43

4.5 – Algoritmos	44
4.5.1 – Algoritmo para Gerar as Imagens Padrões	44
4.5.2 – Algoritmo para o Operador Morfológico de Casamento de Padrões	47
4.5.3 – Algoritmo para o Método da Soma das Diferenças Absolutas	50
4.6 – Medida do Comportamento dos Métodos OMCP e MSDA com Relação as Suas Médias	53
CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO OPERADOR MORFOLÓGICO DE CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO	55
5.1 – Introdução	55
5.2 – Imagens Utilizadas	55
5.3 – Experimentos e Resultados	56
5.3.1 – Experimento 1	58
5.3.2 – Experimento 2	63
5.3.3 – Experimento 3	71
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	79
APÊNDICE A	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 – Ilustração da pesquisa de uma subimagem correspondente a imagem dada pela janela W.	8
3.1 – Exemplos de operadores elementares morfológicos	19
3.2 – Uma família de funções formando uma dilatação	20
3.3 – Uma família de funções formando uma erosão	21
4.1 – Exemplos de ELUTs para dilatação, erosão, anti-dilatação e anti-erosão ...	27
4.2 – Decomposição morfológica do operador de localização do máximo global .	31
4.3 – Simplificação da decomposição morfológica do operador que localiza o máximo global	32
4.4 – Representação morfológica da composição do operador de casamento de padrões com o operador que localiza o máximo global	33
4.5 – Imagens em níveis de cinza	34
4.6 – Esquema para o casamento de padrões utilizando o OMCP	35
4.7 – Seleção e “recorte” do padrão a ser encontrado na imagem de pesquisa	36
4.8 – Representação esquemática da geração das imagens padrões	38
4.9 – Representação esquemática do OMCP – parte I (aplicação do operador ϕ à imagem g e sua decomposição)	40
4.10 – Decomposição da imagem g'	41
4.11 – Representação esquemática do OMCP – parte II (composição de ϕ com $\bar{\psi}$)	42
4.12 – Representação esquemática da busca na imagem de pesquisa g do padrão correspondente ao padrão dado utilizando o OMCP	48
4.13 – Representação esquemática da busca na imagem de pesquisa g do padrão correspondente ao padrão dado utilizando o MSDA	51
5.1 – Esquema para casamento de padrões utilizando o algoritmo implementado para o operador morfológico de casamento de padrões (OMCP)	57
5.2 – Esquema para casamento de padrões utilizando o método da soma das diferenças absolutas (MSDA)	58
5.3 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens TM/90_1 (IR) e TM/94_1 (IP) – padrão 51x51 de IR centrado em (284,120) – folga = 15)	60
5.4 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (241,37) na imagem TM/90_1 (IR) – folga = 15, 30 e 45)	62
5.5 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação as suas médias (padrão 51x51 centrado em (241,37) na imagem TM/90_1 (IR) – folga = 15)	62
5.6 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens TM/90_2 (IR) e TM/94_2 (IP) – padrão 51x51 de IR centrado em (47,268) – folga = 30)	65
5.7 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (75,47) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15, 30 e 45)	67
5.8 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação as suas médias (padrão 51x51 centrado em (75,47) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15)	67
5.9 – Padrão desejado x padrão encontrado pelo OMCP. (a) imagem TM/90_2 (IR) com padrão 51x51 centrado em (345,212). (b) imagem TM/94_2 (IP) com padrão desejado em (344,262) e encontrado em (39,101) – folga = 15 .	69

5.10 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (345,212) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15, 30 e 50)	70
5.11 – Comportamento do OMCP para o padrão desejado e o encontrado (padrão 51x51 centrado em (345,212) na imagem TM/90_2 (IR)– folga = 15)	70
5.12 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens F62 (IR) e F63 (IP) – padrão 15x15 de IR centrado em (233,45) – folga = 38)	72
5.13 – Padrão desejado x padrão encontrado pelo OMCP. (a) imagem F62 (IR) com padrão 31x31 centrado em (251,116). (b) imagem F63 (IP) com padrão desejado em (237,113) e encontrado em (105,67) – folga = 46	74
5.14 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 15x15 centrado em (233,45) na imagem F62 (IR) – folga = 38, 46 e 54)	75
5.15 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação as suas médias (padrão 15x15 centrado interface com o usuário e em (233,45) na imagem F62 (IR) – folga = 38)	75

LISTA DE TABELAS

	Pág.
5.1 – Parâmetros do experimento 1	58
5.2 – Resultados do experimento 1	59
5.3 – Parâmetros do experimento 2	64
5.4 – Resultados do experimento 2	66
5.5 – Parâmetros do experimento 3	71
5.6 – Resultados do experimento 3	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aquisição de informações confiáveis sobre a superfície terrestre e seu ambiente através de imagens é uma tecnologia há muito tempo aceita e amplamente utilizada. Com o desenvolvimento da tecnologia computacional e dos dispositivos de aquisição de dados (sensores de observação da terra transportados por satélites e outros dispositivos de aquisição de dados digitais), novas soluções têm sido constantemente estudadas e implementadas.

O rápido avanço na tecnologia dos sensores nos últimos anos tem oferecido diversas opções para obtenção de dados digitais e o desenvolvimento computacional, tanto em “hardware” quanto em “software”, tem oferecido ferramentas mais adequadas para trabalhar com estes dados. Dentro deste contexto, tem-se procurado dar soluções à tarefa de aquisição de informações por meio de sistemas que englobam tarefas de processamento digital de imagens e processos de análise e extração de informações.

Para Mascarenhas e Velasco (1989), o processamento digital de imagens pode ser entendido como a análise e a manipulação de imagens por computador, com a finalidade de transformá-las de modo que informações possam ser extraídas com mais facilidade e segurança.

O processamento digital de imagens compreende duas grandes classes de transformações:

- *transformações radiométricas*, onde os valores dos níveis de cinza são alterados sem modificar a geometria da imagem;
- *transformações geométricas*, onde a geometria da imagem é alterada, mantendo-se o máximo possível os valores dos níveis de cinza.

Estas transformações são realizadas com o objetivo de eliminar distorções da imagem introduzidas, em geral, pelo sistema de imageamento, ou enfatizar certas características da imagem. Tanto as entradas quanto as saídas destas transformações são imagens.

A análise de imagens é um processo de descoberta, identificação e compreensão de padrões que são relevantes ao desempenho de uma tarefa baseada em imagens (Gonzalez e Woods, 1992), utilizando critérios objetivos e, sempre que possível, quantitativos (Serra, 1982; Barrera, 1987).

O processo de análise de imagens produz descrições de uma imagem de entrada, onde o conteúdo e o significado das descrições estão intimamente ligados com a aplicação. Segundo Mascarenhas e Velasco (1989), neste processo ocorre uma redução do volume de dados e de informações, mantendo-se o conteúdo informativo relevante a uma dada aplicação. A entrada deste processo é uma imagem, enquanto que a saída é uma descrição desta imagem, onde o conteúdo e o formato desta descrição também dependem da finalidade a que ela se destina (Mascarenhas e Velasco, 1989; Ventura et al., 1990).

Para facilitar as tarefas de processamento digital de imagens e o processo de análise de imagens, muito esforço tem sido dedicado no estudo e implementação de metodologias automatizadas. Por sua vez, para introduzir a automatização desejada faz-se necessário identificar cada etapa do processo e definir procedimentos computacionais que realizem estas etapas.

Um sistema de processamento e análise de imagens poderá, em algum momento, se deparar com metodologias de aquisição de informações por meio de imagens que envolvam o processamento e a análise de duas ou mais imagens de uma mesma cena. E estas metodologias podem precisar comparar imagens tomadas em tempos e/ou sensores diferentes, o que pode resultar em encontrar correspondências entre objetos que estão presentes em duas ou mais imagens. A identificação e localização de correspondências entre imagens ou entre uma imagem e um padrão, é conhecida na literatura como casamento de imagens (*image matching*) ou de padrões (*template matching*).

Como as imagens podem ser descritas por meio de representações pictoriais ou simbólicas, diversos são os métodos encontrados na literatura que procuram resolver o problema de casamento de imagens ou de padrões. Estes métodos exploram tanto o conteúdo radiométrico (níveis de cinza) das imagens, quanto as informações simbólicas (feições pontuais, lineares ou de área) e suas interrelações.

A Morfologia Matemática é uma abordagem que pode ser utilizada para resolver problemas de naturezas diversas em processamento e análise de imagens (Banon e Barrera, 1994). As soluções destes problemas pela Morfologia Matemática são dadas por meio de uma sondagem e transformações de um objeto por padrões de formas pré-definidas. Portanto, esta abordagem parece bastante adequada ao problema de casamento de padrões. Diante disto, neste trabalho, o problema de casamento de imagens será abordado através da Morfologia Matemática.

1.2 – OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é implementar e testar um operador de casamento de padrões em imagens em níveis de cinza, bem como dar uma representação morfológica para este operador, com base nas abordagens apresentadas por Banon (1995, 1997, 1997a).

A implementação é realizada no Khoros, que é um sistema integrado de desenvolvimento de software para processamento e visualização de informações (Apêndice A).

Para testar o operador proposto, são utilizadas imagens TM/Landsat e fotografias aéreas digitalizadas. Estas imagens apresentam diferenças geométricas em translação, enquanto que as diferenças em rotação e escala são mínimas ou inexistem.

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado como descrito a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma visão geral dos métodos de casamento de imagens ou de padrões encontrados

na literatura consultada. No Capítulo 3 é apresentada uma caracterização dos operadores elementares da Morfologia Matemática (dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões). No Capítulo 4 é dada uma representação morfológica para o operador de casamento inexato de padrões e uma representação para o método da soma das diferenças absolutas, bem como os respectivos algoritmos. No Capítulo 5 são apresentados os experimentos realizados, com imagens TM/Landsat e fotografias aéreas digitalizadas, para testar o operador proposto, bem como os resultados obtidos. No Capítulo 6 são apresentadas algumas conclusões e considerações sobre o operador proposto, com base nos testes realizados e nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

CASAMENTO DE PADRÕES

2.1 – INTRODUÇÃO

Os métodos de casamento de imagens ou de um padrão e uma imagem, destinam-se a solucionar o problema de encontrar correspondências entre representações de um mesmo objeto, ou ainda, a determinação da posição de um padrão numa imagem (Goshtasby, 1985; Flusser e Suk, 1994). A solução deste problema é fundamental em registro de imagens, orientação de modelos, visão, reconhecimento de padrões, detecção de movimento, detecção de mudanças, atualização de mapas, análise de imagens médicas, produção de dados tridimensionais, etc. (Medioni e Nevatia, 1984; Goshtasby, 1985; Li e Dubes, 1985; Maragos, 1988; Haala e Vosselman, 1992).

A diversidade e a importância dos problemas existentes têm levado à implementação de diversos métodos de casamento de imagem, uma vez que o desempenho de cada metodologia é dependente dos dados. E para facilitar o processo, muito esforço tem sido dedicado ao estudo e implementação de metodologias automatizadas.

Este capítulo apresenta o problema de casamento de imagens ou de padrões, bem como uma visão geral dos métodos existentes que procuram dar uma solução automatizada para este problema.

2.2 – CASAMENTO DE IMAGENS OU DE PADRÕES

O casamento é um processo em que representações existentes para um mesmo objeto são colocadas em correspondência (Ballard e Brown, 1982; Moik, 1980). Dado um padrão representando um objeto e alguns dados de entrada coletados por sensores, o propósito do casamento é interpretar estes dados com base neste padrão. Desta forma, o casamento estabelece uma correspondência entre os dados de entrada e os padrões que representam os objetos do mundo real (Ballard e Brown, 1982).

No processo de registro de imagens, por exemplo, um método de casamento deve ser capaz de resolver o seguinte problema (Ton e Jain, 1989): dadas duas imagens f e g , contendo m e n prováveis pontos de controle, respectivamente, e dentre eles l pontos em comum; como determinar os l pares de pontos correspondentes entre as imagens?

Segundo Lemmens (1988), a correspondência entre entidades ou objetos pode ser descrita formalmente como a seguir. Seja $E^o = e_i^o$ ($i = 1, \dots, l$), o conjunto das entidades (ou objetos) no espaço objeto (mundo real); $E^1 = e_i^1$ ($i = 1, \dots, m$), o conjunto das entidades na primeira imagem; e $E^2 = e_i^2$ ($i = 1, \dots, n$) o conjunto das entidades na segunda imagem. Devido à natureza do imageamento, o número de entidades presentes no espaço objeto, na imagem 1 e na imagem 2, podem ser diferentes; de forma que existem entidades que estão presentes na imagem 1, mas não estão presentes na imagem 2, e vice-versa. A tarefa do casamento é selecionar para cada e_i^1 , um e somente um e_i^2 , de forma que e_i^1 e e_i^2 sejam mapeamentos da mesma entidade e_i^o no espaço objeto.

Diversos são os métodos estudados e implementados para resolver o problema de encontrar correspondências entre imagens ou entre uma imagem e um padrão (o termo padrão significa aqui uma descrição simbólica de um objeto). Segundo Medioni e Nevatia (1984), estes métodos podem ser caracterizados pelo tipo de representação utilizada para descrever a imagem e o padrão no processo de casamento. A imagem e o padrão podem ser descritos por meio de representações pictoriais ou simbólicas, conforme mencionado no Capítulo 1, onde na representação pictorial (imagem intensidade) o elemento constituinte é o “pixel”, o qual representa a energia refletida pelos objetos de uma cena e captada por um sensor; enquanto que, na representação simbólica, os elementos constituintes podem representar os objetos e suas interrelações.

Para Lemmens (1988), a cada entidade na imagem pode ser atribuído um conjunto de atributos A , consistindo dos elementos a_i ($i = 1, \dots, k$) e descrevendo algumas propriedades (tais como: nível médio de cinza, variância, comprimento, forma, área e alongamento). E mais, para cada entidade na imagem, pode ser atribuído também um conjunto de atributos relacionais R , consistindo dos elementos r_i ($i = 1, \dots, h$) que descrevem as

relações com as entidades vizinhas (tais como: acima, abaixo, à direita, à esquerda e próximo). Uma entidade pode ainda ser descrita pelos K -níveis de cinza que a compõem. Desta forma, tem-se que uma entidade pode ser descrita por A , R e K , e todas as três formas podem ser utilizadas no processo de casamento, em conjunto ou separadamente. Como por exemplo, no casamento por correlação, uma entidade é descrita pelos níveis de cinza dos pixels que a compõem.

Desta forma, baseado na natureza dos atributos utilizados, o casamento de imagens ou de padrões pode ser classificado em três classes (Lemmens, 1988; Hannah, 1988; Bins, 1988; Toth e Schenk, 1992a; Hsieh et al., 1992; Flusser e Suk, 1994):

- casamento de sinais (ou casamento baseado em área);
- casamento de feições (ou casamento baseado em feições);
- casamento relacional (ou estrutural).

A seguir é apresentada uma visão geral das três classes de casamento e de alguns métodos encontrados na literatura consultada, segundo esta classificação.

2.2.1 – CASAMENTO DE SINAIS (OU CASAMENTO BASEADO EM ÁREA)

O conceito do casamento de sinais (também denominado por casamento baseado em área) está baseado no fato de que uma região de uma imagem de referência, delimitada por uma janela W , é estatisticamente comparada com regiões de mesmo tamanho (subimagens s^x) de uma outra imagem da mesma cena (imagem de pesquisa), como ilustrado na Figura 2.1 (Goshtasby, 1985; Lemmens, 1988; Hannah, 1989; Toth and Schenk, 1992a). Utilizando as intensidades dos pixels (valores dos níveis de cinza) um valor para o casamento é calculado, em geral, para o centro da janela.

Os métodos de casamento de sinais trabalham diretamente com as intensidades (níveis de cinza) das imagens, onde a similaridade é indicada pela semelhança entre os níveis de cinza entre regiões de duas imagens (Goshtasby, 1985; Hannah, 1988; Lemmens, 1988; Maragos, 1988; Toth e Schenk, 1992a; Hsieh et al., 1992; Flusser e Suk, 1994),

como por exemplo a imagem dada pela janela W e a subimagem s^x da Figura 2.1. O método de casamento de sinais consiste basicamente em (Barnea e Silverman, 1972; Moik, 1980; Erthal, 1985; Bins, 1988; Hannah, 1989):

- extrair regiões (delimitadas por janelas W) da imagem de referência que contêm feições bem definidas e que estão presentes também na imagem de pesquisa (estas regiões podem ser denominadas como padrões);
- selecionar regiões na imagem de pesquisa (como a região S ilustrada na Figura 2.1);
- deslocar as janelas (contendo os padrões extraídos da imagem de referência) sobre as regiões selecionadas na imagem de pesquisa, e por meio das intensidades dos níveis de cinza dos pixels das respectivas subimagens, calcular o grau de casamento (ou a medida de similaridade);
- avaliar o ponto de melhor casamento por meio da medida de similaridade.

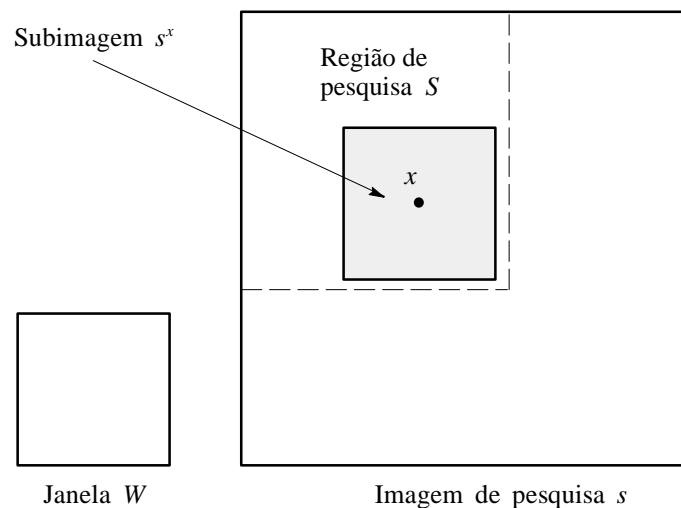


Fig. 2.1 – Ilustração da pesquisa de uma subimagem correspondente a imagem dada pela janela W .

A medida de similaridade pode ser computada por meio de diversos critérios, tais como: coeficiente de correlação; função de correlação; função de correlação normalizada; soma dos módulos das diferenças; soma dos erros quadráticos (Barnea e Silverman,

1972; Moik, 1980; Goshtasby, 1985; Erthal, 1985; Bins, 1988; Lemmens, 1988; Hannah, 1989; Ventura et al., 1990; Toth e Schenk, 1992a; Flusser e Suk, 1994).

O ponto de melhor casamento é obtido por maximização quando se utiliza os critérios do coeficiente de correlação, da função de correlação, e da função de correlação normalizada; e por minimização quando são utilizados os critérios da soma dos módulos das diferenças e da soma dos erros quadráticos (Erthal, 1985; Maragos, 1988; Hannah, 1989).

Uma crítica comum aos métodos envolvendo técnicas de correlação refere-se à alta complexidade computacional deles e sensibilidade a variações de escala, rotação e níveis de cinza (Hannah, 1989; Ventura et al., 1990; Flusser e Suk, 1994). Segundo Goshtasby e Stockman (1985), se uma imagem está rotacionada com relação a outra, nenhuma das medidas de similaridade mencionadas acima pode ser utilizada, porque mesmo que os centros de duas janelas, referentes a cada uma das imagens, sejam correspondentes, os demais pontos da janela não se corresponderão e, portanto, uma baixa medida de similaridade poderá ser obtida. Quando uma imagem está rotacionada com relação a outra, é impossível duas janelas retangulares conterem as mesmas partes da cena, exceto quando as duas janelas estão rotacionadas, uma com relação a outra, por múltiplos de 90° .

O paradigma original de casamento de padrão compara o padrão com todas as possíveis regiões de pesquisa na imagem, utilizando alguma medida de similaridade para localizar a posição mais provável do objeto. Diversos algoritmos têm sido propostos para reduzir a carga computacional imposta pela aplicação deste paradigma. Métodos sequenciais (Barnea e Silverman, 1972; Erthal, 1985) reduzem o número de pixels do padrão que devem ser comparados com os pixels da imagem, acumulando o erro entre o padrão e a área de pesquisa. Pobres casamentos são rapidamente descartados porque os erros são acumulados rapidamente; porém a dificuldade deste método está em encontrar o limiar adequado para descartar o casamento. Métodos hierárquicos inspecionam as imagens de resolução reduzida para identificar as prováveis localizações para o objeto na imagem inteira; mas embora a baixa resolução simplifique a computação, o procedimento torna-se menos sensível. O casamento de padrões em dois estágios utiliza sub-padrões no primeiro estágio

para determinar as prováveis posições dos padrões na área de pesquisa, e os padrões completos para determinar o melhor casamento dentre aqueles prováveis; porém, embora reduza a carga computacional, aumenta a possibilidade de perder objetos ou identificá-los erroneamente (Li e Dubes, 1985; Goshtasby, 1985).

Para Barnea e Silverman (1972), num ponto de correspondência, a soma dos módulos dos erros é uma medida acumulativa do ruído entre duas cenas. Enquanto que, em qualquer outro ponto de referência o erro deve ser considerado como sendo a soma do ruído, devido ao fato de que as cenas são diferentes e não são correspondentes. Então, pode-se dizer que o ruído total é mínimo no ponto de correspondência.

2.2.2 – CASAMENTO DE FEIÇÕES (OU CASAMENTO BASEADO EM FEIÇÕES)

Os métodos de casamento baseados em feições transformam a imagem original em um espaço de feições (pontos, linhas ou áreas), onde é realizado o casamento. As feições são extraídas utilizando-se operadores de borda (Hannah, 1989; Toth e Schenk, 1992a). Um operador de borda, em geral, transforma uma imagem em níveis de cinza em uma nova imagem, e a limiarização converte esta imagem em uma imagem binária.

Desta forma, estes métodos de casamento não trabalham diretamente com os níveis de cinza das imagens e sim com descrições simbólicas, porque eles utilizam as feições da cena (intersecções de linhas, bordas, linhas, regiões, centróides de regiões, etc) para encontrar correspondências (Flusser e Suk, 1994).

Diversos autores têm abordado o problema de encontrar correspondências entre imagens utilizando feições. Toth e Schenk (1992a) propõem um método para encontrar correspondências onde as feições são extraídas utilizando-se como detector de bordas o operador Laplaciano da Gaussiana (LoG), e na sequência as bordas são transformadas em linhas e mudanças abruptas na curvatura produzem vértices. Medioni e Nevatia (1984) apresentam um método para casamento de imagens utilizando feições lineares como primitivas para o casamento, o qual apresenta um bom desempenho quando as distorções geométricas são relativamente pequenas. Flusser e Suk (1994) apresentam um método para casa-

mento de feições onde as imagens são segmentadas e as regiões de bordas fechadas são extraídas; cada região é representada por um conjunto de características baseadas em momentos invariantes.

2.2.3 – CASAMENTO RELACIONAL (OU ESTRUTURAL)

Como uma imagem pode ser descrita pelos objetos que ela contém e como estes estão relacionados espacialmente, os métodos de casamento relacional (ou estrutural) levam em consideração além dos atributos descritivos da entidade, as relações existentes entre entidades (Shapiro e Haralick, 1981; Lemmens, 1988; Bins, 1988; Ton e Jain, 1989; Ventura et al., 1990). A representação dos objetos e suas interrelações pode tomar a forma de grafos; e como um grafo é constituído de nós e arcos, os nós representam os objetos e os arcos as relações entre estes objetos (Lemmens, 1988; Bins, 1988; Haala e Vosselman, 1992).

Segundo Haala e Vosselman (1992), uma descrição estrutural consiste de uma parte primitiva e de uma parte relacional. A parte primitiva contém as primitivas geométricas, como pontos, linhas e regiões, que representam as partes do objeto. As primitivas são caracterizadas por um conjunto de valores de atributos, como comprimento da linha, tipo de linha ou tamanho da região. A parte relacional descreve as interrelações entre estas primitivas, como ângulos entre linhas, conexões entre linhas e pontos e entre linhas e regiões; e pode também ser caracterizada por valores de atributos.

Bins (1988) apresenta um método para realizar o casamento de imagens, no qual as informações contextuais (atributos dos objetos e relações entre eles) são consideradas. Neste método, as imagens são segmentadas e os objetos extraídos são representados por meio de descritores de forma e níveis de cinza; e na sequência são calculadas as relações espaciais entre os objetos e uma descrição na forma de grafos direcionados é obtida para cada imagem. A seguir, um grafo de associação estabelecendo as possíveis correspondências entre nós e entre arcos é gerado; e o melhor casamento entre estruturas é calculado utilizando técnicas de relaxação.

Para Ton e Jain (1989), em geral, existem dois tipos de informação que podem ser utilizados no casamento de pontos de controle: propriedades características associadas com cada ponto, e distâncias relativas entre pontos. O conceito básico do algoritmo de casamento proposto por eles, está baseado na seguinte suposição: se (A_i, B_j) é um par verdadeiro, então para algum outro ponto A_h na imagem A pode existir um ponto B_r na imagem B tal que a distância (A_i, A_h) é igual a distância (B_j, B_r) . Isto é verdade se (A_h, B_r) é também um casamento correto. Se (A_i, B_j) é um par verdadeiro, então é esperado que os $m - 1$ pares de pontos restantes (A_h, B_r) forneçam um suporte para (A_i, B_j) .

No método de casamento apresentado por Ventura et al. (1990), uma descrição simplificada das imagens, representada por meio de objetos ou regiões (denominados estruturas) com um conjunto de propriedades e relações, e o uso de ferramentas de avaliação baseadas em variáveis linguísticas e lógicas multivalores permite uma avaliação da similaridade das estruturas pertencentes às imagens consideradas.

No método de casamento relacional proposto por Haala e Vosselman (1992), as descrições relacionais estão baseadas na informação estrutural que está contida nas relações entre as feições (as quais representam pontos de controle naturais, tais como, rodovias, rios e parcelas de terra). Então, estas feições topográficas (cruzamentos de rodovias, junções de drenagem e contornos de parcelas de terra) são tomadas como elementos básicos nas descrições relacionais, utilizadas no passo de casamento. São utilizadas também as relações topológicas e geométricas destas feições. Desta forma, o problema de reconhecer um ponto de controle natural é definido como um problema de casar uma descrição relacional de um “pedaço” da imagem com a descrição relacional do modelo do ponto de controle natural. Métodos de busca em árvore são utilizados para casar as descrições relacionais derivadas da imagem com as descrições dos pontos de controle naturais.

Estes métodos possibilitam trabalhar com variações de escala, rotação e níveis de cinza, pelo fato das propriedades e relações representadas pelas estruturas relacionais não variarem com as transformações mencionadas (Lemmens, 1988; Ton e Jain, 1989; Ventura et al., 1990).

CAPÍTULO 3

OPERADORES ELEMENTARES DA MORFOLOGIA MATEMÁTICA

3.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas algumas noções de Morfologia Matemática para imagens em níveis de cinza, ou seja, a caracterização para as quatro classes de operadores elementares da Morfologia Matemática: dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões.

A Morfologia Matemática surgiu na década de sessenta na Escola Superior de Minas de Paris, em Fontainebleau, como resultado dos estudos realizados por um grupo de pesquisa liderado por Georges Matheron e Jean Serra. A partir dos anos oitenta, a Morfologia Matemática encontrou também adeptos em outros centros de pesquisa da Europa e Estados Unidos, e atualmente é um campo fértil de pesquisas, tanto teóricas como práticas, em universidades e centros de pesquisas de todo o mundo.

A palavra *morfologia* vem do grego e significa estudo (*logia*) das formas (*morphos*). Consistente com o significado literal, o propósito da Morfologia Matemática é analisar e descrever quantitativamente as estruturas em imagens por meio de sondagens e transformações por padrões de formas pré-definidas.

Originalmente, a teoria da Morfologia Matemática foi desenvolvida para imagens binárias (Serra, 1982) e posteriormente foi estendida para imagens em níveis de cinza (Serra, 1982; Sternberg, 1986). Desta forma, os operadores elementares da Morfologia Matemática são definidos sobre dois reticulados completos (ver Seção 3.2 – Definição 3.3): das imagens binárias e das imagens em níveis de cinza. Um estudo mais detalhado sobre este assunto pode ser encontrado em: Serra, 1982; Sternberg, 1986; Haralick et al., 1987; Heijmans, 1991; Banon e Barrera, 1994; Banon, 1995.

Sob o ponto de vista teórico, a Morfologia Matemática estuda as decomposições de operadores (isto é, mapeamentos e transformações) entre reticulados completos.

Através da teoria da Morfologia Matemática é possível provar que qualquer operador pode ser decomposto em termos das quatro classes de operadores elementares: dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões (Banon e Barrera, 1991; Banon e Barrera, 1993). Portanto, estas quatro classes de operadores elementares da Morfologia Matemática são de fundamental importância para a decomposição/representação de mapeamentos entre reticulados completos.

Utilizando os operadores elementares da Morfologia Matemática e as operações de união e intersecção, é possível construir uma linguagem formal sobre um conjunto finito de reticulados completos. Esta linguagem é chamada de Linguagem Morfológica (Barrera, 1992; Banon e Barrera, 1994).

A seguir são apresentadas algumas definições, e na sequência as caracterizações dos operadores elementares morfológicos.

3.2 – ALGUMAS DEFINIÇÕES

Esta seção apresenta algumas definições básicas (base matemática), que serão utilizadas na caracterização dos operadores elementares morfológicos.

Definição 3.1 (Conjunto Parcialmente Ordenado) – Seja E um conjunto. Diz-se que uma relação R , sobre o conjunto E , é uma *relação de ordem* se, e somente se, são válidas as seguintes condições:

O1: (*Propriedade Reflexiva*) – para todo $x \in E$, tem-se xRx ;

O2: (*Propriedade anti-simétrica*) – quaisquer que sejam $x, y \in E$, se xRy e yRx , então $x = y$;

O3: (*Propriedade transitiva*) – quaisquer que sejam $x, y, z \in E$, se xRy e yRz , então xRz .

Dados dois elementos $a, b \in E$, e E sendo ordenado pela ordem R , pode acontecer que “ a não está na relação com b ” e “ b não está na relação com a ”, isto é, a e b não são

comparáveis pela ordem R ; para frisar este fato costuma-se dizer que uma relação R que satisfaz os axiomas O1, O2 e O3 é uma *ordem parcial*. Se uma ordem R sobre um conjunto E satisfaz a condição:

O4: quaisquer que sejam x e y em E , tem-se xRy ou yRx ;

diz-se que R é uma *ordem total*, e neste caso pode-se dizer que E é um *conjunto totalmente ordenado ou cadeia*.

Definição 3.2 (Supremo e Ínfimo) – Seja L um conjunto, $X \subset L$ e $l, u \in L$. Diz-se que u é um *limitante superior* de X se, para todo $x \in X$ tem-se $x \leq u$, e que l é um *limitante inferior* de X se, para todo $x \in X$ tem-se $l \leq x$. O *supremo* de X em (L, \leq) , se existir, é o menor limitante superior de X , ou seja, um limitante superior x de X , tal que $x \leq u$, para qualquer outro limitante superior u de X . O *ínfimo* de X em (L, \leq) , se existir, é o maior limitante inferior de X , ou seja, um limitante inferior y de X , tal que $l \leq y$, para qualquer outro limitante inferior l de X .

Definição 3.3 (Reticulado Completo) – Seja L um conjunto parcialmente ordenado. Diz-se que L é um *reticulado completo* se todo subconjunto não-vazio X de L tem um supremo e um ínfimo.

3.3 – OPERADORES ELEMENTARES MORFOLÓGICOS

Os operadores elementares da Morfologia Matemática podem ser apresentados de forma axiomática (Heijmans, 1991; Barrera, 1992; Banon e Barrera, 1994; Banon, 1995) e a partir daí serem deduzidas as formas construtivas, chamadas de caracterizações dos operadores elementares, que permitem as implementações em computador. Nesta linha de abordagem, Banon (1995) introduz os operadores de forma axiomática e apresenta a caracterização dos operadores elementares de janela invariantes por translação (com janela W) que transformam uma imagem em níveis de cinza, com contra-domínio K_m finito, numa imagem em níveis de cinza, com contra-domínio K_n finito.

Aqui são apresentados os operadores elementares da Morfologia Matemática somente de forma axiomática. As provas das proposições a seguir se encontram em Banon (1995).

3.3.1 – DEFINIÇÃO AXIOMÁTICA DOS OPERADORES ELEMENTARES

Seja (L, \leq_L) , ou simplesmente (L, \leq) ou L , um reticulado completo (Birkhoff, G. (1967), citado por Banon, 1995):

- o supremo e o ínfimo de um subconjunto X de L são denotados, respectivamente, por $\sup_L X$ e $\inf_L X$, ou simplesmente, por $\sup X$ e $\inf X$;
- a união e a intersecção de uma família $(a_i)_{i \in I}$ de elementos de L , indexada por um conjunto I , são denotadas, respectivamente, por $\bigvee_{i \in I} a_i$ e $\bigwedge_{i \in I} a_i$.

Sejam L_1 e L_2 dois reticulados completos. Um operador (mapeamento entre dois reticulados completos) ψ de L_1 em L_2 é *crescente* (ou *isotônico*) se, e somente se,

$$a \leq b \Rightarrow \psi(a) \leq \psi(b) \quad (a, b \in L_1) \quad (3.1)$$

A imagem de um subconjunto X de L_1 é denotada por $\psi(X)$ e dada por:

$$\psi(X) = \{y \in L_2 : \exists x \in X, y = \psi(x)\} \quad (3.2)$$

Proposição 3.1 (definições equivalentes de operadores crescentes) – Sejam L_1 e L_2 dois reticulados completos e X um subconjunto de L_1 . Um operador ψ de L_1 em L_2 é crescente se, e somente se,

$$\sup \psi(X) \leq \psi(\sup X) \quad (3.3)$$

ou

$$\psi(\inf X) \leq \inf \psi(X). \quad (3.4)$$

Um operador ψ de L_1 em L_2 é *decrecente* (ou *anti-isotônico*) se, e somente se,

$$a \leq b \Rightarrow \psi(b) \leq \psi(a) \quad (a, b \in L_1) \quad (3.5)$$

Proposição 3.2 (definições equivalentes de operadores decrescentes) – Sejam L_1 e L_2 dois reticulados completos e X um subconjunto de L_1 . Um operador ψ de L_1 em L_2 é decrescente se, e somente se,

$$\psi(\sup X) \leq \inf \psi(X) \quad (3.6)$$

ou,

$$\sup \psi(X) \leq \psi(\inf X). \quad (3.7)$$

Os operadores elementares da Morfologia Matemática são definidos da seguinte forma (Banon, 1995):

- ψ de (L_1, \leq) em (L_2, \leq) é uma dilatação $\Leftrightarrow \psi(\bigvee_{i \in I} a_i) = \bigvee_{i \in I} \psi(a_i)$ para toda família $(a_i)_{i \in I}$ em L_1 ;
- ψ de (L_1, \leq) em (L_2, \leq) é uma erosão $\Leftrightarrow \psi(\bigwedge_{i \in I} a_i) = \bigwedge_{i \in I} \psi(a_i)$ para toda família $(a_i)_{i \in I}$ em L_1 ;
- ψ de (L_1, \leq) em (L_2, \leq) é uma anti-dilatação $\Leftrightarrow \psi(\bigvee_{i \in I} a_i) = \bigwedge_{i \in I} \psi(a_i)$ para toda família $(a_i)_{i \in I}$ em L_1 ;
- ψ de (L_1, \leq) em (L_2, \leq) é uma anti-erosão $\Leftrightarrow \psi(\bigwedge_{i \in I} a_i) = \bigvee_{i \in I} \psi(a_i)$ para toda família $(a_i)_{i \in I}$ em L_1 .

As dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões são ditas ser operadores elementares, uma vez que todo operador entre reticulados completos pode ser decomposto a partir destas classes, como demonstrado por Banon e Barrera (1991, 1993).

Sejam i_1 e o_1 , o maior e o menor elemento de L_1 , respectivamente, isto é, $i_1 = \sup L_1$ e $o_1 = \inf L_1$; e i_2 e o_2 , o maior e o menor elemento de L_2 , respectivamente, isto é, $i_2 = \sup L_2$ e $o_2 = \inf L_2$.

Proposição 3.3 (propriedades dos operadores elementares) – Sejam L_1 e L_2 dois reticulados completos. Então, tem-se as seguintes afirmações:

$$\delta \in \Delta(L_1, L_2) \Rightarrow \delta \text{ é crescente e } \delta(o_1) = o_2$$

$$\varepsilon \in E(L_1, L_2) \Rightarrow \varepsilon \text{ é crescente e } \varepsilon(i_1) = i_2$$

$$\delta^a \in \Delta^a(L_1, L_2) \Rightarrow \delta^a \text{ é decrescente e } \delta^a(o_1) = i_2$$

$$\varepsilon^a \in E^a(L_1, L_2) \Rightarrow \varepsilon^a \text{ é decrescente e } \varepsilon^a(i_1) = o_2.$$

onde, $\Delta(L_1, L_2)$, $E(L_1, L_2)$, $\Delta^a(L_1, L_2)$ e $E^a(L_1, L_2)$ denotam, respectivamente, as classes de dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões de (L_1, \leq) em (L_2, \leq) .

3.3.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS OPERADORES ELEMENTARES SOBRE UMA CADEIA LIMITADA

Nesta seção, será considerado o caso onde o domínio L_1 dos operadores elementares é uma cadeia limitada (i.e., um conjunto limitado totalmente ordenado). Neste caso, como L_1 é um reticulado completo, o supremo e o ínfimo com relação a L_1 podem ser substituídos, respectivamente, por máximo e mínimo, de forma que $i_1 = \max L_1$ e $o_1 = \min L_1$.

Proposição 3.4 (caracterização dos operadores elementares definidos sobre uma cadeia limitada) – Seja L_1 uma cadeia limitada, L_2 um reticulado completo, ψ um operador de L_1 em L_2 , $i_1 = \max L_1$ e $o_1 = \min L_1$, $i_2 = \sup L_2$ e $o_2 = \inf L_2$. Então tem-se as seguintes afirmações:

$$\psi \text{ é uma dilatação} \Leftrightarrow \psi \text{ é crescente e } \psi(o_1) = o_2$$

$$\psi \text{ é uma erosão} \Leftrightarrow \psi \text{ é crescente e } \psi(i_1) = i_2$$

ψ é uma anti-dilatação $\Leftrightarrow \psi$ é decrescente $\psi(o_1) = i_2$

ψ é uma anti-erosão $\Leftrightarrow \psi$ é decrescente e $\psi(i_1) = o_2$.

3.3.2.1 – EXEMPLOS DE OPERADORES ELEMENTARES

A seguir são dados dois exemplos de operadores elementares sobre cadeias limitadas.

Sejam $K_m = [0, m] \subset \mathbf{Z}$ e $K_n = [0, n] \subset \mathbf{Z}$ (onde \mathbf{Z} é o conjunto dos números inteiros) duas cadeias limitadas.

EXEMPLO 1: Operadores elementares definidos entre duas cadeias finitas, K_m e K_n .

Da Proposição 3.4 tem-se que um mapeamento (operador) p de K_m em K_n é:

- uma dilatação se, e somente se, p é crescente e $p(\min K_m) = \min K_n$;
- uma erosão se, e somente se, p é crescente e $p(\max K_m) = \max K_n$;
- uma anti-dilatação se, e somente se, p é decrescente e $p(\min K_m) = \max K_n$;
- uma anti-erosão se, e somente se, p é decrescente e $p(\max K_m) = \min K_n$.

A Figura 3.1 mostra dois exemplos para cada uma das classes de operadores elementares morfológicos de K_7 em K_3 .

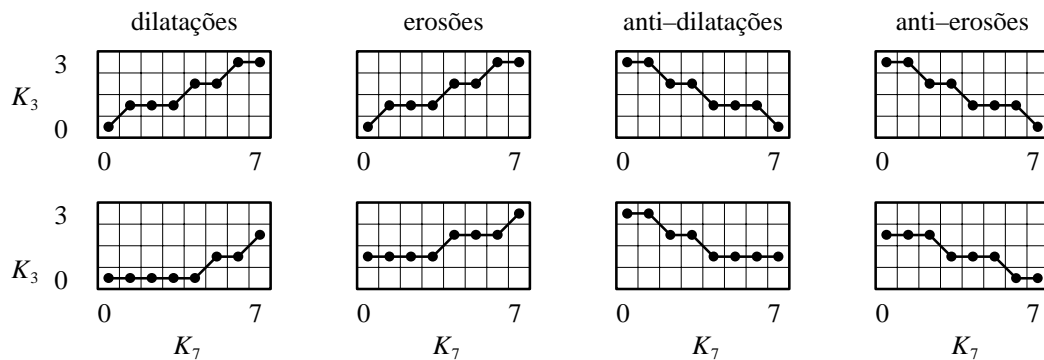


Fig. 3.1 – Exemplos de operadores elementares morfológicos.

FONTE: Banon (1995), p.10.

EXEMPLO 2: Mapeamentos de K_m em K_n^W ou, equivalentemente, famílias de funções de K_n^W indexadas por K_m , onde W é um conjunto não-vazio e K_n^W denota o conjunto de mapeamentos de W em K_n .

O maior e o menor elemento de K_n^W são, respectivamente, as funções constantes g^* e g_* , dadas por:

$$g^*(y) \triangleq \max K_n \quad (3.8)$$

$$g_*(y) \triangleq \min K_n \quad (3.9)$$

para $y \in W$.

Da Proposição 3.4 tem-se que um mapeamento (operador) p de K_m em K_n^W é:

- uma dilatação se, e somente se, p é crescente e $p(\min K_m) = g_*$;
- uma erosão se, e somente se, p é crescente e $p(\max K_m) = g^*$;
- uma anti-dilatação se, e somente se, p é decrescente e $p(\min K_m) = g^*$;
- uma anti-erosão se, e somente se, p é decrescente e $p(\max K_m) = g_*$.

A Figura 3.2 mostra uma dilatação d de K_3 em K_7^W , onde W é um conjunto com 5 elementos. Esta dilatação é uma família crescente de quatro funções de W em K_7 , indexadas por K_3 , onde a primeira função é g_* , isto é, a função constante assumindo valor 0.

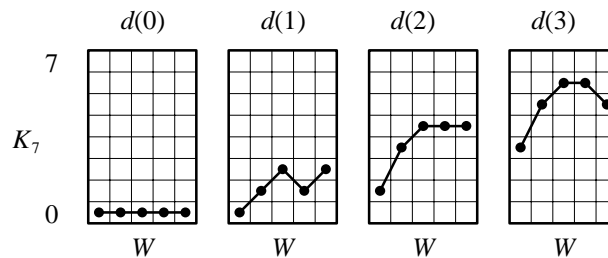


Fig. 3.2 – Uma família de funções formando uma dilatação.

FONTE: Banon (1995), p.12.

A Figura 3.3 mostra uma erosão e de K_7 em K_3^W , onde W é um conjunto com 5 elementos. Esta erosão é uma família crescente de oito funções de W em K_3 , indexadas por K_7 , onde a última função é g^* , isto é, a função constante assumindo o valor 3.

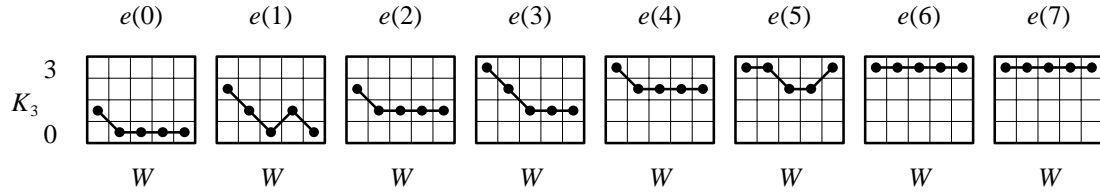


Fig. 3.3 – Uma família de funções formando uma erosão.
FONTE: Banon (1995), p.12.

CAPÍTULO 4

OPERADORES DE CASAMENTO DE PADRÕES

4.1 – INTRODUÇÃO

Como abordado no Capítulo 2, os métodos de casamento de padrões destinam-se a encontrar correspondências entre representações ou elementos constituintes de imagens.

É possível que em duas imagens da mesma cena alguns objetos que se correspondam tenham formas um pouco diferentes, devido a diferenças radiométricas ou modificações ocorridas na cena durante o intervalo de tempo decorrido entre as aquisições. No seu processo de geração, a imagem de uma cena pode sofrer variações devidas às variações no valor da intensidade de luz refletida pelos pontos da cena, variações no “brilho”, oriundas de fenômenos aleatórios (como ruídos) e mesmo variações devidas a fenômenos físicos de grande dificuldade de modelagem, como o “espalhamento atmosférico”, que atinge as imagens geradas por sensores orbitais.

Shapiro e Haralick (1981) trabalhando com casamento de descrições estruturais, representadas por grafos, formularam os conceitos de *casamento exato* e *casamento inexato*. Para eles quando não ocorrem observações ruidosas e alterações randômicas dos padrões para todas as classes de padrões, o casamento exato de descrições estruturais é um procedimento apropriado. Como no mundo real alterações estruturais randômicas ocorrem, senão por outra razão, pelo menos pelo fato de que as observações e as medidas das relações estruturais tem sempre algum componente de ruído randômico associado a elas, não se pode esperar que dois padrões da mesma classe tenha descrições iguais para o casamento estrutural. Isto conduz naturalmente ao conceito de casamento inexato, onde são procurados os casamentos que não são necessariamente perfeitos, mas apenas suficientemente bons. Bins (1988) e Lemmens (1988) também apresentam a idéia de casamento inexato.

Considerando que na prática raramente ocorre um casamento exato, devido às variações nas imagens mencionadas anteriormente, na Seção 4.3 é dada uma representação morfológica para os operadores de casamento inexato utilizando-se o conceito de casamento inexato apresentado por Shapiro e Haralick (1981). Utilizando estes operadores é definido um operador morfológico de casamento de padrões (OMCP) em imagens em níveis de cinza. Na Seção 4.4 é apresentado o Método da Soma das Diferenças Absolutas (MSDA) para casamento de padrões, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com o OMCP. Na Seção 4.5 são apresentados os algoritmos para o OMCP e o MSDA. Uma medida do comportamento de ambos os métodos é apresentada na Seção 4.6.

4.2 – DEFINIÇÕES BÁSICAS

A seguir são dadas algumas representações e definições que serão utilizadas na definição dos operadores de casamento de padrões.

Sejam:

- \mathbf{Z} o conjunto dos números inteiros;
- \mathbf{Z}^2 o produto cartesiano $\mathbf{Z} \times \mathbf{Z}$ (conjunto dos pares ordenados de inteiros);
- D, E – subconjuntos de \mathbf{Z}^2 ;
- $K_n = [0, n] \subset \mathbf{Z}$.

Tomando-se, por exemplo, o subconjunto E de \mathbf{Z}^2 , o conjunto dos mapeamentos de E em K_n é denotado por K_n^E . Segundo Banon (1995) estes mapeamentos são representações matemáticas apropriadas para as imagens em níveis de cinza com domínio E (conjunto das posições dos pixels) e escala de cinza K_n (conjunto dos possíveis valores dos pixels).

Portanto, as imagens digitais que estão sendo consideradas, podem ser representadas como elementos de K_n^E . Se $f \in K_n^E$ e n é igual a 1, então f é uma imagem binária; caso contrário, ela é uma imagem em níveis de cinza.

Definição 4.1 – Seja $f \in K_n^E$. A *média de f* , denotada por $\mu(f)$, é o número real dado por:

$$\mu(f) \triangleq (1/\#E) \left(\sum_{x \in E} f(x) \right) \quad (4.1)$$

onde $\#E$ é o número de elementos de E .

Definição 4.2 – Sejam w_1 e w_2 dois números naturais. O subconjunto de Z^2 denotado por W e denominado por *janela*, é o subconjunto dado por:

$$W \triangleq [-w_1, w_1] \times [-w_2, w_2] \subset Z^2. \quad (4.2)$$

Um elemento de W será denotado por w e será utilizado para indicar um ponto (w_1, w_2) .

Definição 4.3 – Seja $f \in K_n^E$ e $W \subset E$. A *restrição de f a W* , denotada por f_W , é uma função de W em K_n (isto é, $f_W \in K_n^W$) dada por:

$$(f_W)(x) \triangleq f(x) \quad (x \in W). \quad (4.3)$$

Definição 4.4 – Seja $f_W \in K_n^W$, e c_1 e c_2 ($c_1 \leq c_2$) duas constantes inteiras. Pode-se definir as seguintes funções f_W^- e f_W^+ de W em K_n :

$$f_W^-(x) \triangleq \max \{0, \min (n, f_W(x) + c_1)\} \quad (x \in W) \quad (4.4a)$$

$$f_W^+(x) \triangleq \max \{0, \min (n, f_W(x) + c_2)\} \quad (x \in W). \quad (4.4b)$$

4.3 – REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DO OPERADOR DE CASAMENTO DE PADRÕES

Nesta seção é dada uma representação morfológica para o operador de casamento de padrões em imagens em níveis de cinza. Este operador é chamado de *operador morfológico de casamento de padrões* (OMCP) e é dado pela composição do operador de casamento de padrões com um outro, que localiza o nível de cinza máximo global numa imagem em níveis de cinza.

O símbolo \circ que aparece em algumas definições a seguir denota a composição de mapeamentos.

4.3.1 – DEFINIÇÃO DE ALGUNS OPERADORES ELEMENTARES

A seguir são definidos alguns operadores elementares da Morfologia Matemática.

Definição 4.5 – Seja E um subconjunto não-vazio de \mathbf{Z}^2 , e l um número inteiro entre 0 e n . Os operadores de K_n^E em K_1^E , denotados por $\delta_b, \varepsilon_b, \delta_l^a$ e ε_l^a , são os operadores definidos por:

$$\delta_l(f) \triangleq d_l \circ f \quad (4.5a)$$

$$\varepsilon_l(f) \triangleq e_l \circ f \quad (4.5b)$$

$$\delta_l^a(f) \triangleq d_l^a \circ f \quad (4.5c)$$

$$\varepsilon_l^a(f) \triangleq e_l^a \circ f \quad (4.5d)$$

para todo $f \in K_n^E$; onde,

$$d_l(s) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } s > l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5e)$$

$$e_l(s) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } s \geq l \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.5f)$$

$$d_l^a(s) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } s \leq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5g)$$

$$e_l^a(s) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } s < l \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.5h)$$

para todo $s \in K_n$.

Conforme Banon (1995, 1997) e Proposição 3.4 – Capítulo 3, os mapeamentos d_b, e_b, d_l^a e e_l^a são, respectivamente, uma *dilatação*, uma *erosão*, uma *anti-dilatação* e uma *anti-erosão*; e são chamados de Tabelas de Transformações Elementares (Elementary

Look Up Tables – ELUTs) por Banon (1995). Consequentemente, δ_l , ε_l , δ_l^a e ε_l^a são, respectivamente, uma *dilatação*, uma *erosão*, uma *anti-dilatação* e uma *anti-erosão*.

A Figura 4.1 mostra alguns exemplos de ELUTs de K_4 em K_1 . Nesta figura pode-se observar que:

- (δ_l) e (ε_l) são famílias decrescentes de funções de K_n em K_1 , e que $\varepsilon_l = \delta_{l-1}$ para todo l entre 1 e n ;
- δ_l^a e ε_l^a são famílias crescentes de funções de K_n em K_1 , e que $\varepsilon_l^a = \delta_{l-1}^a$ para todo l entre 1 e n .

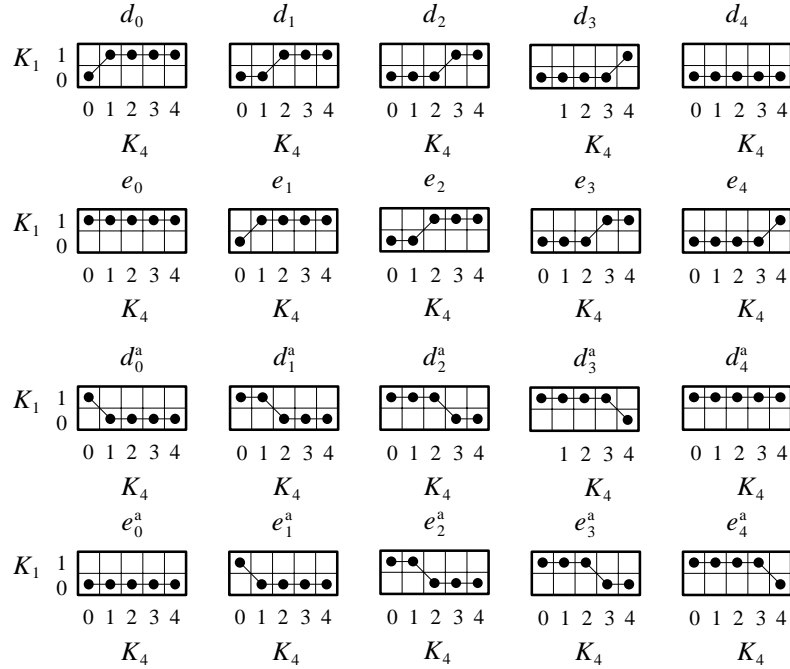


Fig. 4.1 – Exemplos de ELUTs para dilatação, erosão, anti-dilatação e anti-erosão.

FONTE: Adaptada de Banon (1997).

Definição 4.6 – Seja E um subconjunto não-vazio de \mathbb{Z}^2 e l um número inteiro entre 0 e n . Os operadores definidos pelas Expressões (4.5a), (4.5b), (4.5c) e (4.5d), podem ser definidos de forma equivalente por:

$$\delta_l(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(x) > l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.6a)$$

$$\varepsilon_l(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(x) \geq l \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.6b)$$

$$\delta_l^a(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(x) \leq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.6c)$$

$$\varepsilon_l^a(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(x) < l \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.6d)$$

para todo $f \in K_n^E$ e $x \in E$.

Definição 4.7 – Seja E um subconjunto não-vazio de \mathbf{Z}^2 , e 0_E e 1_E mapeamentos de E em K_1 assumindo, respectivamente, os valores constantes 0 e 1. O operador de K_1^E em K_1^E , denotado por δ_E^a , é o operador definido por:

$$\delta_E^a(f) \triangleq \begin{cases} 1_E, & \text{se } f = 0_E \\ 0_E, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

para todo $f \in K_1^E$. O operador δ_E^a é uma *anti-dilatação* (Banon, 1997).

4.3.2 – OPERADORES DE CASAMENTO DE PADRÕES E DE CASAMENTO INEXATO

Nesta seção são dadas a definição de operadores de casamento de padrões e uma representação morfológica para o operador de casamento inexato de padrões em imagens em níveis de cinza.

A seguir são definidos mais alguns operadores elementares da Morfologia Matemática.

Definição 4.8 – Seja $W \subset \mathbf{Z}^2$ uma janela (Definição 4.2), D e E dois subconjuntos não-vazios de \mathbf{Z}^2 , tal que $D = E \oplus W$, e l um número inteiro entre 0 e m . Os operadores de K_m^D em K_1^E , denotados por ε_l^i e δ_l^{ai} , são os operadores definidos por:

$$\varepsilon_l^i(g)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } g(x + w_i) \geq l \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.8a)$$

$$\delta_l^{ai}(g)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } g(x + w_i) \leq l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.8b)$$

para $g \in K_m^D$ e $x \in E$; onde, $n = \#W$; $i = 1, \dots, n$; e $i \mapsto w_i$ é uma bijeção entre $\mathbf{n} = \{1, \dots, n\}$ e W (enumeração das posições de W). O símbolo \oplus representa a adição de Minkowski de dois conjuntos (Banon e Barrera, 1994).

Definição 4.9 – Sejam ε_l^i e δ_l^{ai} os operadores de K_m^D em K_1^E dados pelas Expressões (4.8a) e (4.8b), e f_W^- e f_W^+ as funções dadas pelas Expressões (4.4a) e (4.4b). O operador de K_m^D em K_1^E , denotado por λ^i , é o operador definido por:

$$\lambda^i \triangleq \varepsilon_{f_W^-(w_i)}^i \wedge \delta_{f_W^+(w_i)}^{ai} \quad (4.9)$$

onde, W é uma janela (Definição 4.2); $n = \#W$; $i = 1, \dots, n$; e $i \mapsto w_i$ é uma bijeção entre $\mathbf{n} = \{1, \dots, n\}$ e W (enumeração das posições de W).

Segundo Banon e Barrera (1993, 1994), um mapeamento dado pela intersecção de uma erosão com uma anti-dilatação é um mapeamento sup-gerador. Portanto, o operador λ^i dado pela Expressão (4.9) é um mapeamento sup-gerador.

Definição 4.10 – Seja λ^i o operador definido pela Expressão (4.9). O operador de K_m^D em K_n^E , denotado por ϕ e denominado por *operador de casamento de padrões*, é o operador dado por:

$$\phi \triangleq \sum_{i=1, \dots, n} \lambda^i, \quad (4.10)$$

onde os $\lambda^i(g)(x)$, relativos a imagem $g \in K_m^D$ e a $x \in E$, são aqui denominados por *condições de casamento*.

Definição 4.11 – Sejam D e E dois subconjuntos não-vazios de \mathbf{Z}^2 , ϕ um operador de K_m^D em K_n^E , δ_l o operador dado pela Definição 4.6 (Expressão 4.6a) e l um número inteiro

entre 1 e n . Os operadores ϕ_l de K_m^D em K_1^E , chamados de *operadores de casamento inexato*, são os operadores definidos por:

$$\phi_l = \delta_{l-1} \circ \phi. \quad (4.11)$$

$\phi_l(g)(x)$ é igual a 1 se pelo menos l condições $\lambda^i(g)(x)$, dentre as n , são satisfeitas.

Os operadores $(\phi_l)_{l=1,\dots,n}$ podem ainda ser decompostos na união dos operadores λ^i (Expressão 4.9), resultando em:

$$\phi_l = \bigvee_{\substack{\mathbf{c} \subset \mathbf{n} \\ \#\mathbf{c} = l}} \left(\bigwedge_{i \in \mathbf{c}} \lambda^i \right) \quad (4.12)$$

onde, $\mathbf{n} = \{1, \dots, n\}$.

4.3.3 – OPERADOR DE LOCALIZAÇÃO DO MÁXIMO GLOBAL

Nesta seção é apresentada a decomposição do operador sobre imagens digitais que localiza o nível de cinza máximo global numa imagem em níveis de cinza (Banon, 1997, 1997a). Este operador será decomposto em termos dos operadores elementares da Morfologia Matemática: dilatações, erosões e anti-dilatações.

Definição 4.12 – Um operador $\bar{\psi}$ de K_n^E em K_1^E que localiza o nível de cinza máximo global de uma imagem pode ser expresso da seguinte forma:

$$\bar{\psi}(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(y) \leq f(x) \quad (y \in E) \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.13)$$

para todo $f \in K_n^E$ e $x \in E$.

Definição 4.13 – Sejam δ_l e ε_l os operadores de K_n^E em K_1^E dados pelas Expressões (4.6a) e (4.6b), respectivamente, e δ_E^a o operador de K_1^E em K_1^E dado pela Expressão (4.7), e l um número inteiro entre 0 e n . O operador de K_n^E em K_1^E , denotado por λ_l , é o operador definido por:

$$\lambda_l \triangleq \varepsilon_l \wedge (\delta_E^a \circ \delta_l). \quad (4.14)$$

Segundo Banon e Barrera (1994), a composição de uma anti-dilatação com uma dilatação é uma anti-dilatação. Portanto, λ_l é um mapeamento sup-gerador, uma vez que ele é dado pela intersecção de uma erosão com uma anti-dilatação (Banon e Barrera, 1993, 1994).

Dados os operadores λ_l de K_n^E em K_1^E (Expressão 4.14), o operador $\bar{\psi}$ de K_n^E em K_1^E da Definição 4.12 (Expressão 4.13), pode ser escrito da seguinte forma (Banon, 1996):

$$\bar{\psi} = \bigvee_{l=0, \dots, n} \lambda_l. \quad (4.15)$$

A Figura 4.2 ilustra este resultado.

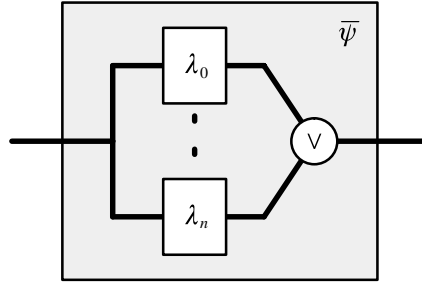


Fig. 4.2 – Decomposição morfológica do operador de localização do máximo global.
FONTE: Banon (1997).

A decomposição morfológica do operador $\bar{\psi}$ apresentada acima, pode ser simplificada com base nas seguintes propriedades:

- $\varepsilon_l = \delta_{l-1}$ para todo l entre 1 e n ;
- para todo $f \in K_n^E$, $\varepsilon_0(f) = 1_E$ (das Expressões 4.6b e 4.7) e $(\delta_E^a \circ \delta_n)(f) = 1_E$ (das Expressões 4.6a e 4.7).

Portanto, o operador $\bar{\psi}$ pode ser dado de forma simplificada pela seguinte expressão:

$$\bar{\psi} = \left(\bigvee_{l=1, \dots, n-1} (\delta_{l-1} \wedge (\delta_E^a \circ \delta_l)) \right) \vee (\delta_E^a \circ \delta_0) \vee \delta_{n-1} \quad (4.16)$$

A simplificação resultante, para $n = 4$, é ilustrada na Figura 4.3.

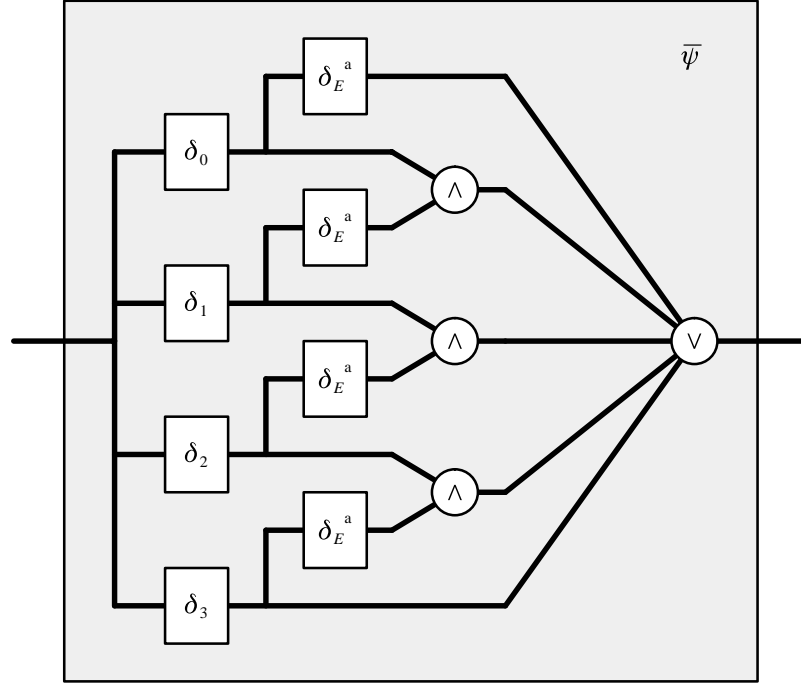


Fig. 4.3 – Simplificação da decomposição morfológica do operador que localiza o máximo global.
FONTE: Banon (1997).

4.3.4 – COMPOSIÇÃO DO OPERADOR DE LOCALIZAÇÃO DO MÁXIMO GLOBAL COM O OPERADOR DE CASAMENTO DE PADRÕES

Nesta seção é apresentada a composição do operador de localização do máximo global com o operador soma de operadores de casamento inexato, a qual define o operador morfológico de casamento de padrões (OMCP).

Aplicando-se os resultados das Seções 4.3.2 e 4.3.3, o operador de K_m^D em K_1^E , dado pela composição $\bar{\psi} \circ \phi$, pode ser morfológicamente representado por:

$$\bar{\psi} \circ \phi = \left(\bigvee_{l=1, \dots, n} (\phi_{l-1} \wedge (\delta_E^a \circ \phi_l)) \right) \vee \phi_n \quad (4.17)$$

onde, ϕ é o operador definido na Seção 4.3.2 e $\bar{\psi}$ o operador definido na Seção 4.3.3, e $\phi_0 = 1_E$.

A Figura 4.4 ilustra a representação dada pela Expressão 4.17, para $n = 4$.

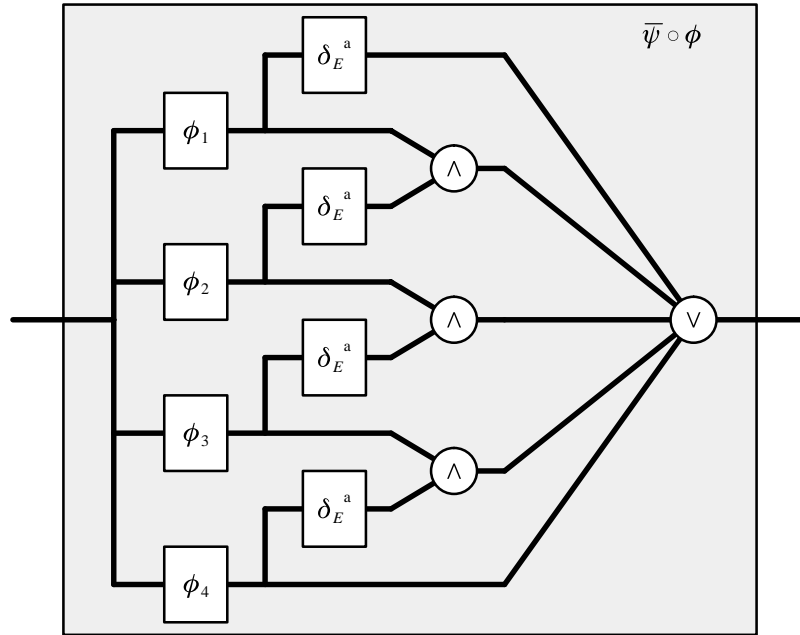


Fig. 4.4 – Representação morfológica da composição do operador de casamento de padrões com o operador que localiza o máximo global.
FONTE: Banon (1997).

O operador $\bar{\psi} \circ \phi$ é operador morfológico de casamento de padrões que marca as posições dos padrões na imagem de pesquisa que se casam com os padrões de referência.

4.3.5 – EXEMPLO DE CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS EM NÍVEIS DE CINZA UTILIZANDO O OPERADOR MORFOLÓGICO DE CASAMENTO DE PADRÕES

Nesta seção é apresentado um exemplo de casamento de padrões em imagens em níveis de cinza utilizando o Operador Morfológico de Casamento de Padrões (OMCP), definido na Seção 4.3.4 deste capítulo.

Sejam $E = [0, 1, \dots, 9] \times [0, 1, \dots, 9]$, $D = [0, 1, \dots, 8] \times [0, 1, \dots, 8]$ e $K_{255} = [0, 255]$. A Figura 4.5 ilustra duas imagens em níveis de cinza f e g , que são funções de E em K_{255} e D em K_{255} , respectivamente.

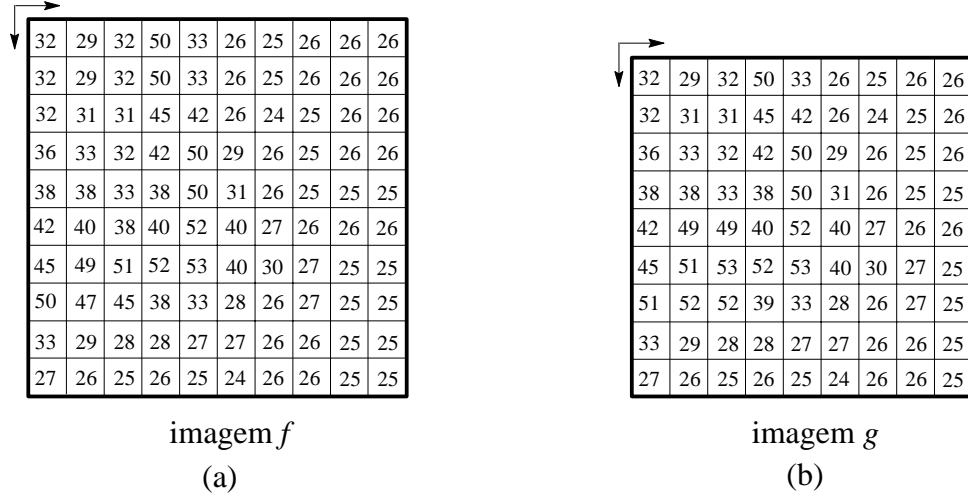


Fig. 4.5 – Imagens em níveis de cinza.

As imagens f e g da Figura 4.5 serão chamadas daqui para frente de *imagem de referência* e *imagem de pesquisa*, respectivamente. Estas imagens serão utilizadas para ilustrar como pode ser efetuado o casamento de padrões em imagens em níveis de cinza utilizando o OMCP.

Dadas duas imagens em níveis de cinza, como por exemplo as imagens f e g da Figura 4.5, o operador humano faz uma inspeção visual e seleciona os padrões candidatos ao casamento. Tendo os padrões selecionados, a Figura 4.6 ilustra de forma esquemática como pode ser efetuado o casamento de padrões com o OMCP. Os operadores μ , ψ_1 , ψ_2 , ϕ e $\bar{\psi}$, que aparecem nesta figura, executam as seguintes operações:

- μ calcula as médias das imagens de referência e de pesquisa (f e g , respectivamente) ;
- ψ_1 “recorta” da imagem de referência os padrões de referência selecionados, pelo operador humano, como candidatos ao casamento ;

- ψ_2 gera as imagens f_W^- e f_W^+ , a partir dos padrões selecionados, das médias das imagens de referência e de pesquisa, e da “folga” definida pelo operador humano, conforme Definição 4.4;
- $\phi \circ \bar{\psi}$ encontra os padrões correspondentes aos padrões de referência, gerando a imagem binária h .

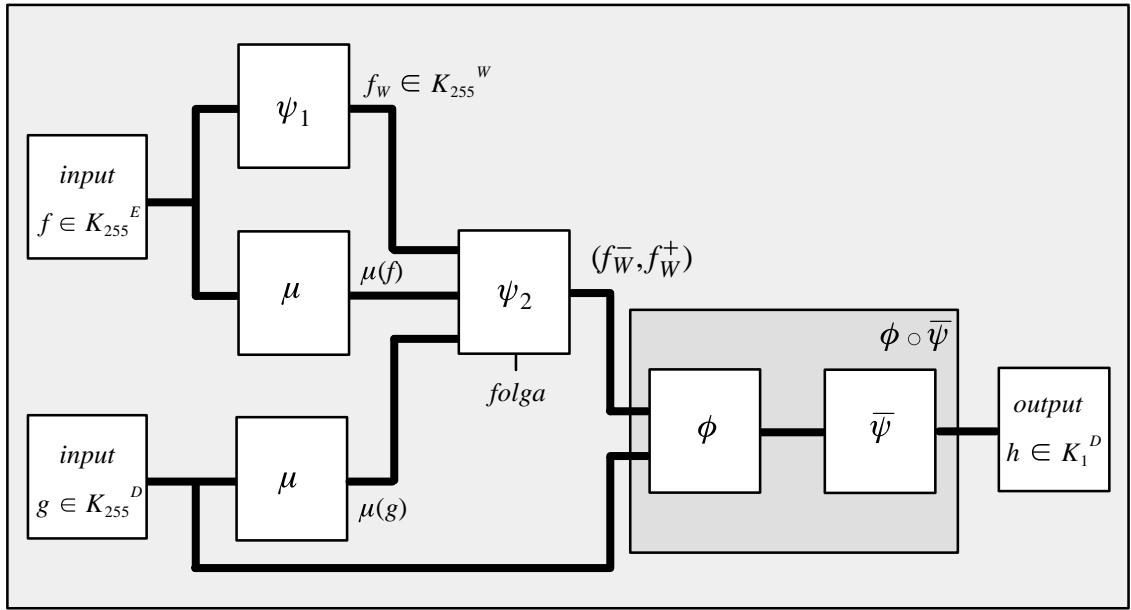


Fig. 4.6 – Esquema para casamento de padrões utilizando o OMCP.

A imagem h é uma função de D em K_1 , onde $D = [0, 1, \dots, 8] \times [0, 1, \dots, 8]$ e $K_1 = [0, 1]$, ou seja, é uma imagem binária resultante da aplicação do OMCP, onde o valor 1 indica a presença do padrão de referência naquela posição, e 0 a ausência.

Vejamos a seguir maiores detalhes sobre: a seleção dos padrões candidatos ao casamento; a geração das imagens f_W^- e f_W^+ ; e a aplicação do OMCP.

4.3.5.1 – SELEÇÃO DE PADRÕES CANDIDATOS AO CASAMENTO

A seleção de padrões candidatos ao casamento consiste em fazer uma inspeção visual nas imagens de referência e de pesquisa (que são imagens da mesma cena) e escolher alguns padrões, os quais devem estar presentes em ambas as imagens, e não apre-

sentar grandes mudanças em forma, tamanho e rotação, de uma imagem para outra. Esta tarefa de seleção dos padrões candidatos ao casamento é executada pelo operador humano.

Os padrões selecionados são delimitados por janelas de tamanho $m \times n$ na imagem de referência e “recortados” pelo operador ψ_1 da Figura 4.6.

Vejam os a seguir um exemplo. Dadas as imagens f e g da mesma cena (ilustradas pela Figura 4.5), o padrão f_W delimitado pela janela $W = [4, 5, 6] \times [3, 4, 5] \subset E = [0, 1, \dots, 9] \times [0, 1, \dots, 9]$ é selecionado pelo operador humano, como um candidato ao casamento, e “recortado” pelo operador ψ_1 como ilustrado na Figura 4.7.

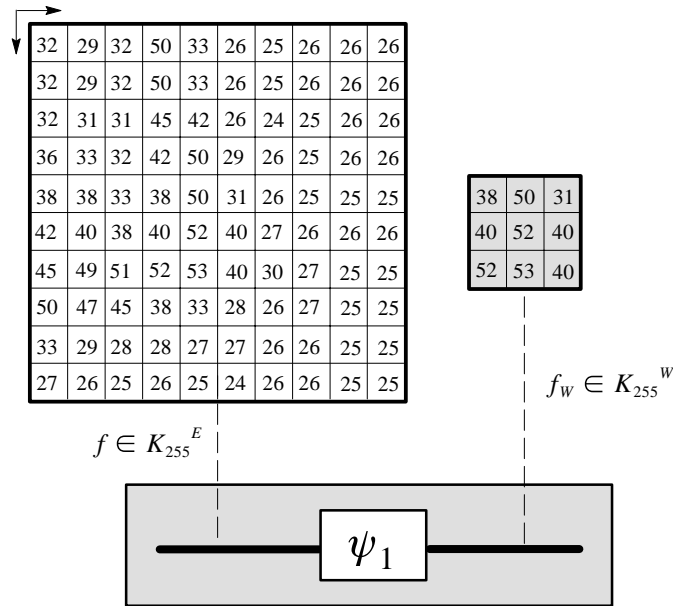


Fig. 4.7 – Seleção e “recorte” do padrão a ser encontrado na imagem de pesquisa.

4.3.5.2 – GERAÇÃO DAS IMAGENS PADRÕES

Nesta seção é apresentado como são geradas as imagens padrões f_W^- e f_W^+ , de modo que o OMCP, como definido na Seção 4.3.4 deste capítulo, encontre na imagem de pesquisa os padrões correspondentes aos padrões selecionados e “recortados” da imagem de referência. Estas imagens são geradas pelo operador ψ_2 da Figura 4.6.

Como o objetivo é encontrar os padrões, na imagem de pesquisa (imagem g), correspondentes aos padrões f_W selecionados na imagem de referência (imagem f) e marcar suas posições na imagem de pesquisa, para gerar as imagens f_W^- e f_W^+ , toma-se por base os valores dos níveis de cinza dos padrões f_W , e leva-se em consideração as diferenças radiométricas existentes entre estas imagens (mencionadas na Seção 4.1 deste capítulo). Para compensar estas diferenças introduz-se um “deslocamento” nos níveis de cinza dos padrões f_W utilizando-se a diferença das médias dos níveis de cinza das imagens f e g ; e uma “folga”, definida pelo operador humano, gerando assim as imagens padrões f_W^- e f_W^+ .

Então, dadas as imagens f e g da mesma cena (Figura 4.5), o padrão f_W (Figura 4.7) e $K_{255} = [0, 255] \subset \mathbf{Z}$, as imagens f_W^- e f_W^+ são geradas da seguinte forma:

- cálculo das médias dos níveis de cinza das imagens f e g (conforme Definição 4.1)

$$\mu(f) \cong 32 \quad \text{e} \quad \mu(g) \cong 33;$$

- cálculo da diferença das médias dos níveis de cinza das imagens f e g :

$$d\mu = \mu(g) - \mu(f) \tag{4.18}$$

$$d\mu(f) = 1;$$

- definição do parâmetro “folga” (F) – neste exemplo o parâmetro “folga” é igual a 2;

- cálculo das constantes c_1 e c_2 :

$$c_1 = d\mu - F/2 \tag{4.19}$$

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = d\mu + F/2 \tag{4.20}$$

$$c_2 = 2$$

- cálculo das imagens f_W^- e f_W^+ – as imagens f_W^- e f_W^+ são geradas conforme Definição 4.4:

$$f_W^-(x) \triangleq \max \{0, \min (m, f_W(x) + c_1)\} \quad (x \in W)$$

$$f_W^+(x) \triangleq \max \{0, \min (m, f_W(x) + c_2)\} \quad (x \in W).$$

A Figura 4.8 ilustra de forma esquemática um exemplo de geração das imagens padrões f_W^- e f_W^+ , a partir do padrão f_W ilustrado na Figura 4.7.

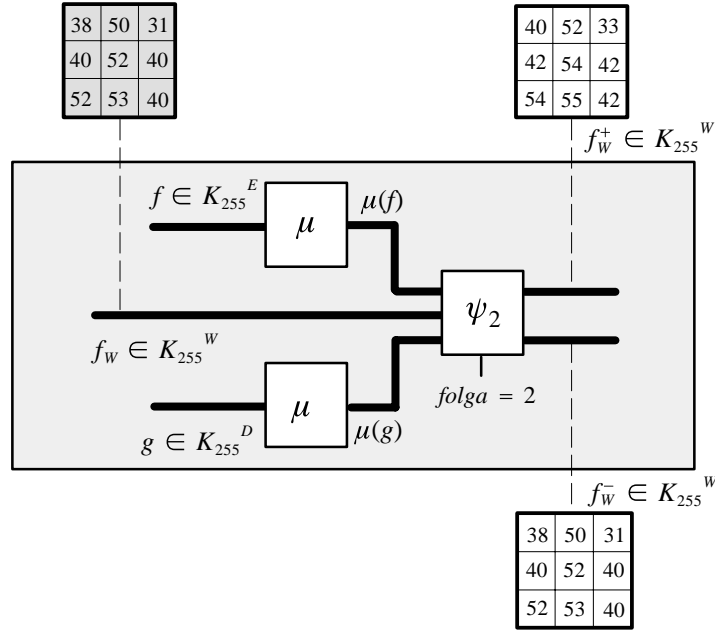


Fig. 4.8 – Representação esquemática da geração das imagens padrões.

4.3.5.3 – APLICAÇÃO DO OPERADOR MORFOLÓGICO DE CASAMENTO DE PADRÕES PARA ENCONTRAR CORRESPONDÊNCIAS

Nesta seção é apresentado como são encontrados os padrões correspondentes em duas imagens, utilizando o OMCP (definido na Seção 4.3.4 deste capítulo). O OMCP é representado na Figura 4.6 pela composição $\bar{\psi} \circ \phi$.

Como o objetivo é encontrar o padrão na imagem de pesquisa (imagem g), correspondente ao padrão selecionado na imagem de referência (imagem f) e marcar sua posição, aplica-se o operador $\bar{\psi} \circ \phi$ à imagem de pesquisa. O operador $\bar{\psi} \circ \phi$ percorre a imagem g e marca o centro do padrão correspondente ao padrão f_W , gerando uma nova imagem (a imagem binária h , como ilustrado na Figura 4.6).

Dadas as imagens padrões f_W^- e f_W^+ (como ilustrado na Figura 4.8), e a imagem de pesquisa g , as Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 ilustram um exemplo da aplicação do OMCP para encontrar na imagem g (Figura 4.5b) o padrão correspondente ao padrão f_W (ilustrado nas Figuras 4.7 e 4.8) .

Como o OMCP (definido na Seção 4.3.4 deste capítulo) é dado pela composição dos operadores $\bar{\psi}$ e ϕ (isto é, $\bar{\psi} \circ \phi$), as Figuras 4.9 e 4.10 ilustram a aplicação do operador ϕ à imagem g e sua decomposição; e a Figura 4.11 ilustra a composição destes dois operadores.

A Figura 4.9 ilustra de forma esquemática o operador ϕ de K_{255}^D em K_9^D e sua decomposição, onde $D = [0, 1, \dots, 8] \times [0, 1, \dots, 8]$, $K_{255} = [0, 255]$ e $K_9 = [0, 9]$. Esta figura ilustra a transformação da função g (imagem g da Figura 4.5b) pelo operador ϕ que é dado pela soma dos operadores λ^i (Definição 4.9), os quais dependem das funções f_W^- e f_W^+ (imagens padrões) que são dadas conforme apresentado na Seção 4.3.5.2 e ilustradas na Figura 4.8. Esta transformação consiste em percorrer a imagem g , comparando se os níveis de cinza dos pixels desta imagem pertencem ao intervalo de níveis de cinza dos pixels correspondentes das imagens f_W^- e f_W^+ , no domínio W . O valor da transformação da função g num dado ponto de D é resultante da soma do número de pixels na janela W em que os valores dos níveis de cinza dos pixels de g pertencem ao intervalo de níveis de cinza dos pixels das imagens f_W^- e f_W^+ , sendo este valor atribuído ao pixel de g referente ao centro da janela W . Então como resultado desta transformação tem-se a imagem $g' \in K_9^D$, ilustrada na Figura 4.9.

A Figura 4.9 ilustra também a aplicação, à imagem g' , da decomposição do operador ϕ na soma de operadores ϕ_l (Definição 4.11) . Na Figura 4.10 é ilustrado o resultado desta decomposição.

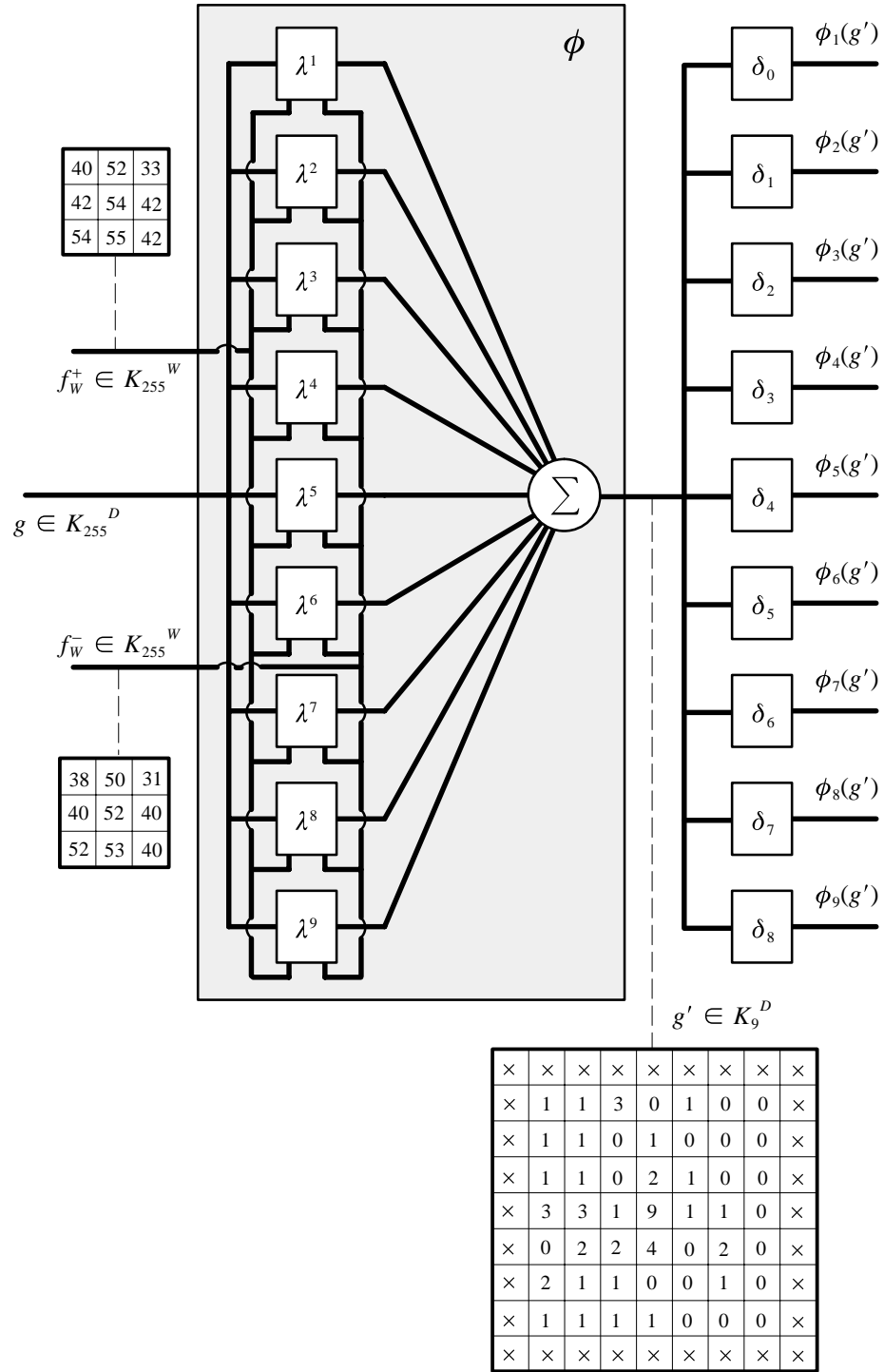


Fig. 4.9 – Representação esquemática do OMCP – parte I (aplicação do operador ϕ à imagem g e sua decomposição).

A Figura 4.11 ilustra de forma esquemática a composição dos operadores ϕ e $\bar{\psi}$, conforme definida na Seção 4.3.4 – Expressão 4.17. Esta transformação gera uma imagem binária que indica onde se encontra o centro do padrão correspondente ao padrão f_W na imagem de pesquisa g . O centro do padrão correspondente ao padrão f_W na imagem g é representado pelo valor 1 nesta imagem de saída.

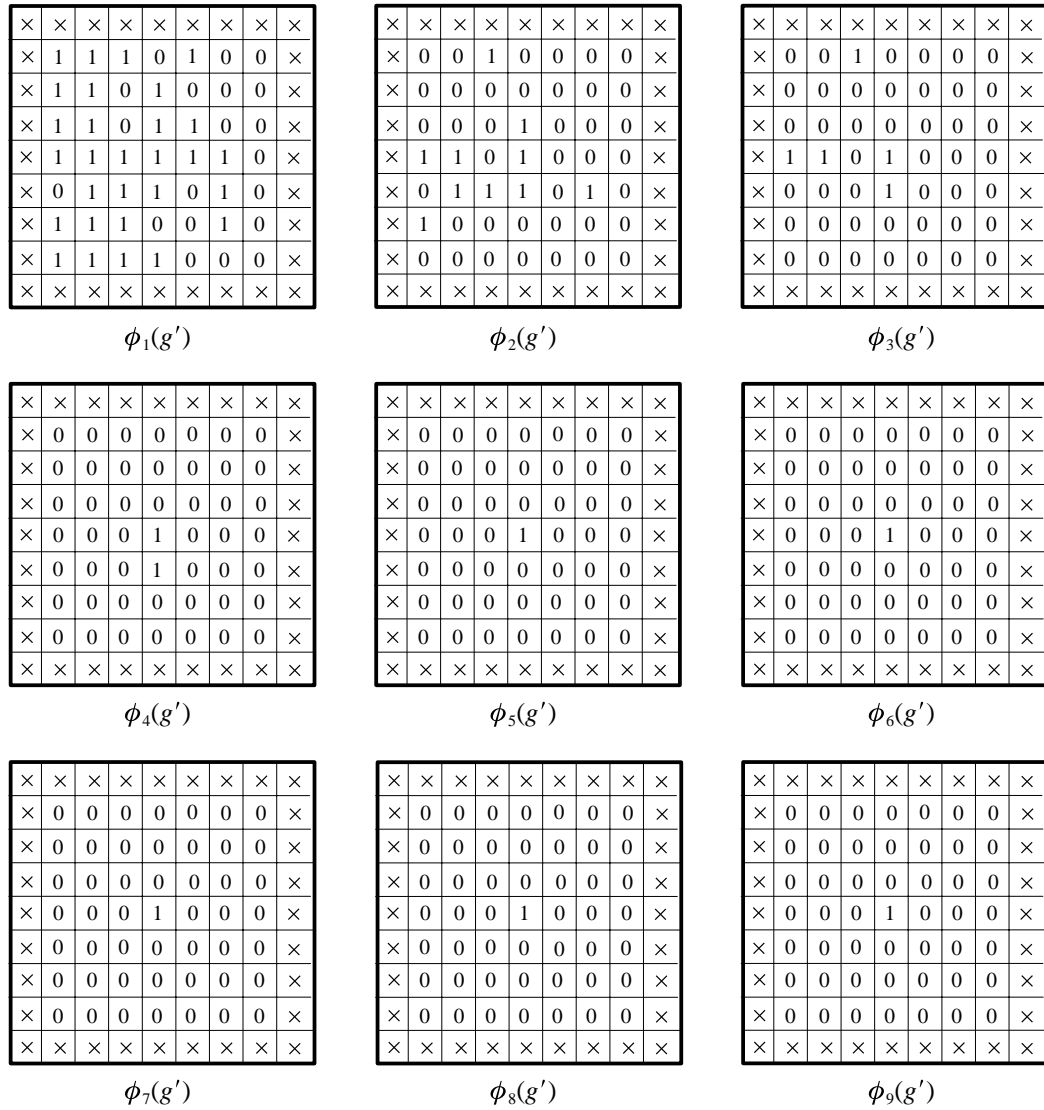


Fig. 4.10 – Decomposição da imagem g' .

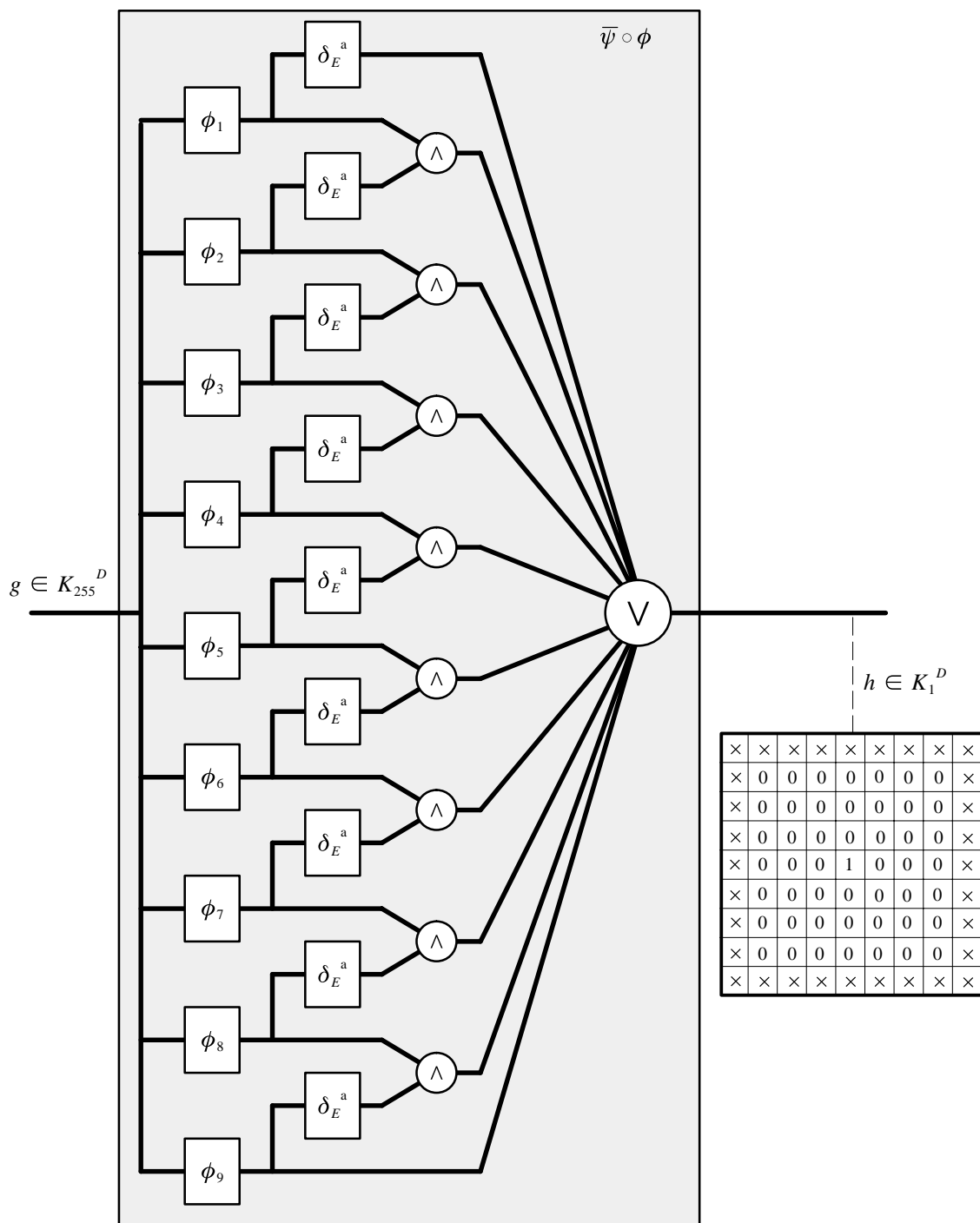


Fig. 4.11 – Representação esquemática do OMCP – parte II (composição de ϕ com $\bar{\psi}$).
 FONTE: Adaptada de Banon (1997).

4.4 – MÉTODO DA SOMA DAS DIFERENÇAS ABSOLUTAS

Nesta seção é apresentada uma representação para o *método da soma das diferenças absolutas* (MSDA). Este método é uma outra forma de medir a similaridade entre padrões em imagens em níveis de cinza para encontrar os possíveis casamentos existentes entre padrões da imagem de referência e da imagem de pesquisa. Ele consiste em percorrer a imagem de pesquisa, calculando a soma das diferenças absolutas entre os níveis de cinza das subimagens desta imagem e aqueles do padrão de referência, para encontrar qual subimagem da imagem de pesquisa é “mais” similar ao padrão dado (Barnea e Silverman, 1972; Erthal, 1985; Bins, 1988). A similaridade é máxima onde a soma das diferenças absolutas é mínima.

Portanto, este método pode ser dado pela composição do operador que calcula a soma das diferenças absolutas dos níveis de cinza do padrão de referência e das subimagens da imagem de pesquisa com um outro, que localiza o nível de cinza mínimo global numa imagem em níveis de cinza. A seguir são definidos estes operadores.

Definição 4.14 – Seja $W \subset E$ uma janela (Definição 4.2), D e E dois subconjuntos não-vazios de \mathbf{Z}^2 , tal que $D = E \oplus W$, e m e n dois números inteiros. O operador γ de K_m^D em K_n^E , chamado de *operador soma das diferenças absolutas*, é definido da seguinte forma:

$$\gamma(g)(x) \triangleq \sum_{i=1, \dots, n} |g(x + w_i) - f_W(w_i)| \quad (4.21)$$

para todo $g \in K_m^D$, $f_W \in K_m^W$ e $x \in E$; onde $n = \#W$; $i = 1, \dots, n$; $i \mapsto w_i$ é uma bijeção entre $\mathbf{n} = \{1, \dots, n\}$ e W (enumeração das posições de W).

Definição 4.15 – Um operador $\underline{\psi}$ de K_n^E em K_1^E que localiza o nível de cinza mínimo global de uma imagem pode ser expresso da seguinte forma:

$$\underline{\psi}(f)(x) \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se } f(y) \geq f(x) \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (y \in E) \quad (4.22)$$

para todo $f \in K_n^E$ e $x \in E$.

Dados os operadores γ de K_m^D em K_n^E (Expressão 4.21) e $\underline{\psi}$ de K_n^E em K_1^E (Expressão 4.22), o operador de casamento de padrões pela soma das diferenças absolutas, ou seja, o MSDA pode ser dado pela composição $\underline{\psi} \circ \gamma$.

O operador $\underline{\psi} \circ \gamma$ é o operador de casamento de padrões pela soma das diferenças absolutas que marca as posições dos padrões na imagem de pesquisa que se casam com os padrões de referência.

4.5 – ALGORITMOS

Nesta seção são apresentados os algoritmos para o OMCP e o MSDA. É apresentado também um algoritmo para gerar as imagens definidas pelas funções f_W^- e f_W^+ (Definição 4.4), as quais serão utilizadas pelo OMCP.

O objetivo dos algoritmos OMCP e o MSDA é percorrer a imagem de pesquisa $g \in K_m^D$, para encontrar um pixel desta imagem que indique o centro de uma sub-imagem g_W similar a imagem f_W (W é uma janela). Como já abordado anteriormente, para o OMCP, a similaridade é máxima onde o maior número de condições são satisfeitas; enquanto que para o MSDA, onde a soma das diferenças absolutas é mínima. Portanto, o melhor casamento ocorre na posição onde está localizado o máximo para o OMCP ou mínimo para o MSDA.

4.5.1 – ALGORITMO PARA GERAR AS IMAGENS PADRÕES

Como mencionado na Seção 4.1 deste capítulo, em situações práticas, as imagens apresentam diferenças radiométricas, de forma que o padrão a ser encontrado na imagem de pesquisa pode apresentar algumas alterações quanto aos níveis de cinza com relação ao padrão correspondente na imagem de referência. Para compensar estas diferenças é introduzido um “deslocamento” e uma “folga” no padrão de referência.

O “deslocamento” no padrão de referência é um fator de compensação radiométrica que tem por objetivo aproximar os níveis de cinza do padrão de referência dos níveis de cinza do seu correspondente na imagem de pesquisa. Este fator pode ser dado pela diferença das médias dos valores de cinza das imagens de referência e de pesquisa (Expressão 4.18 – Seção 4.3.5.2).

Porém, como só o “deslocamento” pode não ser suficiente para compensar as diferenças radiométricas existentes entre as imagens de referência e de pesquisa, é introduzida também uma “folga” em torno do padrão de referência. O parâmetro “folga”, denotado por F , é definido pelo operador humano.

Uma vez calculado $d\mu$ (parâmetro “deslocamento”) e definido o parâmetro “folga”, pode-se calcular as constantes c_1 e c_2 , conforme Expressões 4.19 e 4.20 – Seção 4.3.5.2.

Calculadas as constantes c_1 e c_2 , as imagens f_W^- e f_W^+ podem ser calculadas da seguinte forma (Definição 4.4):

$$f_W^-(w_i) = \max \{0, \min(m, f_W(w_i) + c_1)\}$$

$$f_W^+(w_i) = \max \{0, \min(m, f_W(w_i) + c_2)\}$$

onde, $w_i \in W$ e $f_W(w_i)$ é o valor do nível de cinza do padrão extraído da imagem de referência na posição w_i da imagem f_W . Desta forma, f_W^- e f_W^+ são as imagens correspondentes ao padrão de referência f_W com “deslocamento” e com “folga”.

Estas imagens são utilizadas na aplicação do OMCP, para analisar se numa dada posição da imagem g os valores dos níveis de cinza desta imagem, contidos na janela W , pertencem ou não ao intervalo de níveis de cinza dos pixels das imagens f_W^- e f_W^+ .

Com base nas considerações acima é dado a seguir um algoritmo para gerar as imagens f_W^- e f_W^+ .

ALGORITMO GERA_PADRÕES:

/* Dada uma subimagem f_W da imagem de referência (correspondente ao padrão selecionado nesta imagem) com domínio W , as médias dos níveis de cinza das imagens de referência e de pesquisa ($\mu(f)$ e $\mu(g)$, respectivamente) e uma constante F , este algoritmo gera duas imagens, f_W^- e f_W^+ , com domínio W .*/

int **gera_padrões** ($f_w, mf, mg, m, F, NW, MW, fw1, fw2$)

imagem fw ; /* imagem de entrada (padrão extraído da imagem de referência) */

imagem $fw1$; /* imagem de saída correspondente a f_W^- */

imagem $fw2$; /* imagem de saída correspondente a f_W^+ */

int mf ; /* média dos níveis de cinza da imagem de referência */

int mg ; /* média dos níveis de cinza da imagem de pesquisa */

int m ; /* limite superior do intervalo de níveis de cinza */

int F ; /* constante referente a “folga” a ser introduzida */

int NW, MW ; /* tamanho da janela W */

/* Rotina para gerar imagens referentes ao padrão de referência com “deslocamento” e com “folga”.*/

{int $dm, c1, c2, k, l, i, j, NW2, MW2$

$dm = mg - mf$;

$c1 = dm - F/2$;

$c2 = dm + F/2$;

$NW1 = (1 - NW)/2$;

$NW2 = (NW - 1)/2$;

$MW1 = (1 - MW)/2$;

```

MW2 = (MW - 1)/2 ;

/* Cálculo das imagens fw1 e fw2 */

for (k = NW1; k ≤ NW2; k++)
  for (l = MW1; l ≤ MW2; l++)
    {
      fw1[k][l] = max {0, min(m, fw[k][l] + c1)}
      fw2[k][l] = max {0, min(m, fw[k][l] + c2)}
    }
}

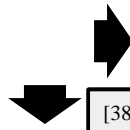
```

4.5.2 – ALGORITMO PARA O OPERADOR MORFOLÓGICO DE CASAMENTO DE PADRÕES

Dada a imagem de pesquisa g e as imagens f_W^- e f_W^+ , o OMCP pode ser dado pelo algoritmo apresentado abaixo. Este algoritmo gera uma imagem em níveis de cinza g' , onde o valor de cada pixel é dado pelo número de pixels da imagem g_W com valores contidos no intervalo dos níveis de cinza dos pixels das imagens f_W^- e f_W^+ (ou seja, o número de condições satisfeitas). Tendo gerado a imagem em níveis de cinza g' , ele procura o nível de cinza máximo global desta imagem e gera uma imagem binária h , onde o valor 1 corresponde ao máximo encontrado em g' .

A Figura 4.12 ilustra um exemplo de como é percorrida a imagem $g \in K_{255}^D$, onde $D = [0, 1, \dots, 8] \times [0, 1, \dots, 8]$ e $K_{255} = [0, 255] \subset \mathbf{Z}$, para encontrar um padrão correspondente ao padrão de referência utilizando o OMCP, com uma janela 3×3 ($W = [-1, 0, 1] \times [-1, 0, 1]$). Os valores entre colchetes na Figura 4.12 representam os níveis de cinza das imagens f_W^- e f_W^+ .

A seguir é dado o algoritmo para o OMCP.



[38,40] 32	[50,52] 29	[31,33] 32	50	33	26	25	26	26
[40,42] 32	[52,54] 31	[40,42] 31	45	42	26	24	25	26
[52,54] 36	[53,55] 33	[40,42] 32	42	50	29	26	25	26
38	38	33	38	50	31	26	25	25
42	49	49	40	52	40	27	26	26
45	51	53	52	53	40	30	27	25
51	52	52	39	33	28	26	27	25
33	29	28	28	27	27	26	26	25
27	26	25	26	25	24	26	26	25

Fig. 4.12 – Representação esquemática da busca na imagem de pesquisa do padrão correspondente ao padrão dado utilizando o OMCP.

ALGORITMO OMCP

/* Dada uma imagem g em níveis de cinza e as imagens f_W^- e f_W^+ (correspondentes ao padrão de referência f_W com “deslocamento” e com “folga”), este algoritmo gera uma imagem binária, calculando o valor do pixel de saída utilizando o OMCP, onde este pixel é um elemento de $D - MO$, sendo D o domínio da imagem e MO a sua moldura, como ilustrado na Figura 4.12.*/

int **omcp** ($g, fw1, fw2, h, NW, MW, N1, M1, N2, M2$)

imagem g ; /* imagem de entrada (imagem de pesquisa) */

imagem $fw1$; /* imagem de entrada correspondente a f_W^- */

imagem $fw2$; /* imagem de entrada correspondente a f_W^+ */

```

imagem gl;          /* imagem que contém o número de condições satisfeitas*/

imagem h;           /* imagem binária de saída */

int NW, MW;         /* tamanho da janela */

int N1, M1;         /* coordenadas iniciais da imagem de entrada */

int N2, M2;         /* coordenadas finais da imagem de entrada */

int cont;           /* contador do número de condições*/

/* Rotina para o operador morfológico de casamento de padrões – OMCP. */

{int k, l, i, j, NW2, MW2, max

    NW2 = NW/2;

    MW2 = MW/2;

    for (k = N1 + NW2; k < N2 - NW2; k + +)

    {

        for (l = M1 + MW2; l < M2 - MW2; l + +)

        {

            cont = 0;

            for (i = 0; i < NW; i + +)

            {

                for (j = 0; j < MW; j + +)

                {

                    if (fw1[i][j] ≤ g[k + i - NW2][l + j - MW2] ≤ fw2[i][j])

                        cont + +;

                }

            }

            gl[k][l] = cont;

        }

    }

}

```

```

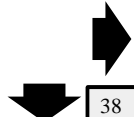
max = 0;
for (k = 0; k < N2 - NW - 1; k++)
{
    for (l = 0; l < M2 - MW - 1; l++)
    {
        if (gl[k][l] > max)
            max = gl[k][l];
    }
}
for (k = 0; k < N2 - NW - 1; k++)
{
    for (l = 0; l < M2 - MW - 1; l++)
    {
        if (gl[k][l] == max)
            h[k][l] = 1;
        else
            h[k][l] = 0;
    }
}
}

```

4.5.3 – ALGORITMO PARA O METODO DA SOMA DAS DIFERENÇAS ABSOLUTAS

Dada a imagem de pesquisa g e a subimagem f_W , o MSDA pode ser dado pelo algoritmo apresentado abaixo. Este algoritmo gera uma imagem em níveis de cinza g' , onde o valor de cada pixel é dado pela soma das diferenças absolutas das imagens g_W e f_W . Tendo gerado a imagem em níveis de cinza g' , ele procura o nível de cinza mínimo global desta imagem e gera uma imagem binária h , onde o valor 1 corresponde ao mínimo encontrado em g' .

A Figura 4.13 ilustra um exemplo de como é percorrida a imagem $g \in K_{255}^D$, onde $D = [0, 1, \dots, 8] \times [0, 1, \dots, 8]$ e $K_{255} = [0, 255] \subset \mathbf{Z}$, para encontrar um padrão correspondente ao padrão de referência utilizando o MSDA, com uma janela 3×3 ($W = [-1, 0, 1] \times [-1, 0, 1]$).



38	50	31						
32	29	32	50	33	26	25	26	26
40	52	40						
32	31	31	45	42	26	24	25	26
52	53	40						
36	33	32	42	50	29	26	25	26
38	38	33	38	50	31	26	25	25
42	49	49	40	52	40	27	26	26
45	51	53	52	53	40	30	27	25
51	52	52	39	33	28	26	27	25
33	29	28	28	27	27	26	26	25
27	26	25	26	25	24	26	26	25

Fig. 4.13 – Representação esquemática da busca na imagem de pesquisa do padrão correspondente ao padrão dado utilizando o MSDA.

A seguir é dado o algoritmo para o MSDA.

ALGORITMO MSDA

/ Dada uma imagem em níveis de cinza e a subimagem f_W (correspondente ao padrão recortado da imagem de referência) este algoritmo gera uma imagem binária, calculando o valor do pixel de saída por meio do MSDA, onde este pixel é um elemento de $D - MO$, sendo D o domínio da imagem e MO a sua moldura, como ilustrado na Figura 4.13./

int **msda** ($g, h, f_W, NW, MW, N1, M1, N2, M2$)

imagem g ; /* imagem de entrada (imagem de pesquisa) */

```

imagem  $gl$ ;      /* imagem que contém as somas das diferenças absolutas */

imagem  $h$ ;        /* imagem de saída */

imagem  $fw$ ;        /* imagem de entrada referente ao padrão de referência */

int  $NW, MW$ ;      /* tamanho da janela */

int  $N1, M1$ ;      /* coordenadas iniciais da imagem de entrada */

int  $N2, M2$ ;      /* coordenadas finais da imagem de entrada */

int  $sda$ ;          /* soma das diferenças absolutas entre  $g_w$  e  $f_w$  */

/* Rotina para o MSDA */

{int  $k, l, i, j, NW2, MW2, min$ 
   $NW2 = NW/2$ ;
   $MW2 = MW/2$ ;

  for ( $k = N1 + NW2; k < N2 - NW2; k++$ )
  {
    for ( $l = M1 + MW2; l < M2 - MW2; l++$ )
    {
       $sda = 0$ ;
      for ( $i = 0; i < NW; i++$ )
      {
        for ( $j = 0; j < MW; j++$ )
        {
           $sda = sda + | g[k + i - NW2][l + j - MW2] - fw[i][j] |$ 
        }
      }
       $gl[k][l] = sda$ ;
    }
  }
}

```

```

min = 0;
for (k = 0; k < N2 - NW - 1; k++)
{
    for (l = 0; l < M2 - MW - 1; l++)
    {
        if (g[k][l] < min)
            min = g[k][l];
    }
}
for (k = 0; k < N2 - NW - 1; k++)
{
    for (l = 0; l < M2 - MW - 1; l++)
    {
        if (g[k][l] == min)
            h[k][l] = 1;
        else
            h[k][l] = 0;
    }
}

```

4.6 – MEDIDA DO COMPORTAMENTO DOS MÉTODOS OMCP E MSDA COM RELAÇÃO AS SUAS MÉDIAS

Nesta seção é dada uma medida do comportamento dos métodos OMCP e MSDA com relação as suas médias, a qual será chamada de *diferença relativa* (Banon, 1996).

Esta medida é efetuada sobre as imagens em níveis de cinza resultantes da aplicação do OMCP e MSDA à imagem de pesquisa.

Seja $f \in K_n^E$. A *diferença relativa*, denotada por Δr , é dada por:

$$\Delta r = (\max f - \mu(f)) / (\max f - \min f) \quad (4.23)$$

onde, $\max f$ é o máximo de f , $\min f$ o mínimo de f , e $\mu(f)$ a média de f (Definição 4.1). Aqui neste trabalho f representa as imagens resultantes da aplicação do OMCP e MSDA, respectivamente.

Observando a Expressão 4.23, pode-se dizer que, quanto mais distante o máximo de f estiver da média de f , maior será o fator Δr do método aplicado.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DO OPERADOR MORFOLÓGICO DE CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

5.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a aplicação do Operador Morfológico para Casamento de Padrões (OMCP), proposto no Capítulo 4 – Seção 4.3, para encontrar padrões correspondentes em imagens (em níveis de cinza) de sensoriamento remoto.

Com a finalidade de analisar comparativamente os resultados do método proposto, este capítulo apresenta também a aplicação do Método da Soma das Diferenças Absolutas (MSDA), apresentado no Capítulo 4 – Seção 4.4, às mesmas imagens utilizadas na aplicação do OMCP, para medir a similaridade entre padrões e encontrar os possíveis casamentos.

5.2 – IMAGENS UTILIZADAS

As imagens utilizadas nos experimentos realizados neste trabalho são as seguintes:

- imagem TM/90_1: subimagem de tamanho 360x360 (linhas x colunas) da imagem TM/LANDSAT – banda 5 – órbita/ponto 220/77/A – obtida na passagem de 09/09/90;
- imagem TM/94_1: subimagem de tamanho 360x360 (linhas x colunas) da imagem TM/LANDSAT – banda 5 – órbita/ponto 220/77/A – obtida na passagem de 18/07/94;
- imagem TM/94_2: subimagem de tamanho 400x400 (linhas x colunas) da imagem TM/LANDSAT – banda 5 – órbita/ponto 220/77/A – obtida na passagem de 09/09/90;
- imagem TM/94_2: subimagem de tamanho 400x400 (linhas x colunas) da imagem TM/LANDSAT – banda 5 – órbita/ponto 220/77/A – obtida na passagem de 18/07/94;

- imagem F62: subimagem de tamanho 300x300 (linhas x colunas) da fotografia aérea 62 digitalizada, da região de São José dos Campos –SP, obtida em 08/04/76;
- imagem F63: subimagem de tamanho 300x300 (linhas x colunas) da fotografia aérea 63 digitalizada, da região de São José dos Campos –SP, obtida em 08/04/76;

5.3 – EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados para testar o OMCP, utilizando as imagens de sensoriamento remoto descritas na Seção 5.2. São apresentados também os resultados obtidos nestes experimentos. Esta seção apresenta também os resultados obtidos pelo MSDA.

Os experimentos foram realizados no sistema *Khoros* via *Cantata* (Apêndice A), utilizando-se rotinas já existentes e rotinas implementadas pelo autor deste trabalho com base nos algoritmos apresentados no Capítulo 4 – Seção 4.5.

A Figura 5.1 ilustra de forma esquemática o casamento de padrões utilizando o algoritmo implementado para o OMCP. As imagens, os parâmetros e os operadores que aparecem nesta figura são os seguintes:

- f e g : imagem de referência (IR) e de pesquisa (IP), respectivamente;
- $folga$: folga em torno do padrão f_W (definida pelo operador humano);
- μ : calcula as médias, $\mu(f)$ e $\mu(g)$, das imagens f e g , respectivamente;
- ψ_1 : “recorta” o padrão, selecionado pelo operador humano na imagem f , gerando a imagem–padrão f_W , do tamanho de uma janela W (definida também pelo operador humano);
- ψ_2 : gera as imagens f_W^- e f_W^+ a partir dos padrões recortados da imagem de referência;
- ϕ : compara as imagens f_W^- e f_W^+ as subimagens da imagem g , cujo domínio é a janela W , e gera a imagem g' , na qual o valor de cada pixel é igual ao número de condições satisfeitas (Capítulo 4 – Seção 4.3.2) quando o centro do padrão está posicionado neste pixel;

- $\bar{\psi}$: encontra o pixel que possui o nível de cinza máximo global na imagem g' e gera a imagem binária h , atribuindo o valor 1 à posição do máximo global encontrado nesta imagem e 0 as demais posições.

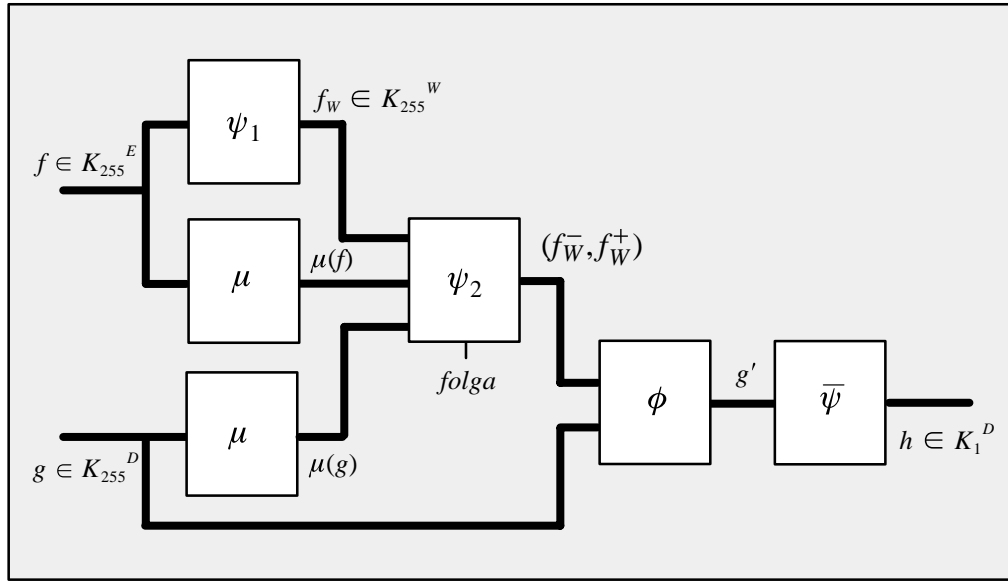


Fig. 5.1 – Esquema para casamento de padrões utilizando o algoritmo implementado para o operador morfológico de casamento de padrões (OMCP).

A Figura 5.2 ilustra de forma esquemática o casamento de padrões utilizando o algoritmo implementado para o MSDA. As imagens, os parâmetros e os operadores que aparecem nesta figura são os seguintes:

- f e g : imagem de referência (IR) e de pesquisa (IP), respectivamente;
- ψ_1 : “recorta” o padrão selecionado pelo operador humano da imagem f , gerando a imagem–padrão f_W , do tamanho de uma janela W (definida também pelo operador humano);
- γ : gera a imagem g' , na qual o valor de cada pixel é igual a soma das diferenças absolutas (Capítulo 4 – Seção 4.4) entre o padrão f_W e uma subimagem de g cujo domínio é a janela W centralizada no pixel;
- $\bar{\psi}$: encontra o pixel que possui o nível de cinza mínimo global na imagem g' e gera a imagem binária h , na qual o valor 1 indica a posição do mínimo global encontrado nesta imagem e 0 as demais posições.

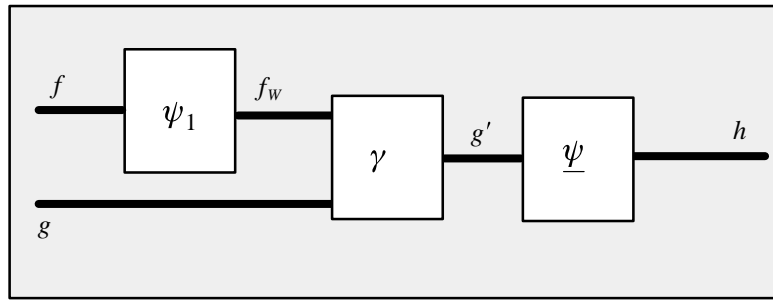


Fig. 5.2 – Esquema para casamento de padrões utilizando o método da soma das diferenças absolutas (MSDA).

A seguir são apresentados os experimentos realizados neste trabalho e seus respectivos resultados por meio de tabelas e gráficos.

5.3.1 – EXPERIMENTO 1

No Experimento 1 são utilizadas as imagens TM/90_1 (IR) e TM/94_1 (IP). Com estas imagens são realizados nove experimentos com o OMCP, conforme o esquema ilustrado na Figura 5.1. Nestes experimentos, são escolhidos três padrões na imagem de referência pelo operador humano, a serem encontrados na imagem de pesquisa, e são utilizadas três “folgas” para cada padrão escolhido.

As folgas e os padrões utilizados neste experimento são apresentados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – PARÂMETROS DO EXPERIMENTO 1

Imagem de Referência (IR): TM/90_1– 360x360		
Padrão em IR		Folga
Tamanho da Janela (colxlin)	Centro do Padrão (col,lin)	
51x51	(241,37)	15
		30
		45
51x51	(284,120)	15
		30
		45
51x51	(37,243)	15
		30
		45

A Figura 5.3 ilustra de forma esquemática a aplicação do OMCP, para o padrão 51x51 centrado na posição (284,120) na imagem de referência e utilizando uma folga igual a 15. Nesta figura os quadrados sobre as imagens f , g , g' e h , indicam o seguinte: na imagem f , a região do padrão de referência a ser encontrado na imagem g ; e nas imagens g , g' e h , a região do padrão correspondente ao padrão de referência, ou seja, na imagem g a região do padrão desejado e nas imagens g' e h a região do padrão encontrado como sendo correspondente ao padrão de referência.

Neste experimento é aplicado também o MSDA, conforme o esquema ilustrado na Figura 5.2, utilizando-se as mesmas imagens e padrões da aplicação do OMCP.

A Tabela 5.2 mostra os resultados do Experimento 1, que consiste na posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa pelo OMCP e MSDA, e uma medida do comportamento (diferença relativa, definida no Capítulo 4 – Seção 4.6) destes métodos com relação as suas médias.

TABELA 5.2 – RESULTADOS DO EXPERIMENTO 1

CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS EM NÍVEIS DE CINZA									
Imagem de Referência (IR): TM/90_1 – 360x360 – de 09/09/90									
Imagem de Pesquisa (IP): TM/94_1 – 360x360 – de 18/07/94									
Padrão em IR		Padrão Desejado em IP	Centro do Padrão Encontrado em IP						
			Operador Morfológico de Casamento de Padrões (OMCP)				Método da Soma das Diferenças Absolutas (MSDA)		
Tam. Jan. (colxlin)	Centro do Padrão (col,lin)	Centro do Padrão (col,lin)	Folga	Nº Max. Cond.	(col,lin)	Dif. Relativa	Min. SDA	(col,lin)	Dif. Relativa
51x51	(241,37)	(240,37)	15	580	(240,37)	0,72	64249	(240,37)	0,47
			30	1151	(240,37)	0,72			
			45	1528	(240,37)	0,70			
51x51	(284,120)	(283,120)	15	571	(283,120)	0,67	63866	(283,120)	0,42
			30	1057	(283,120)	0,64			
			45	1440	(283,120)	0,63			
51x51	(37,243)	(37,242)	15	657	(37,243)	0,75	60043	(36,242)	0,54
			30	1250	(36,242)	0,74			
			45	1648	(36,242)	0,73			

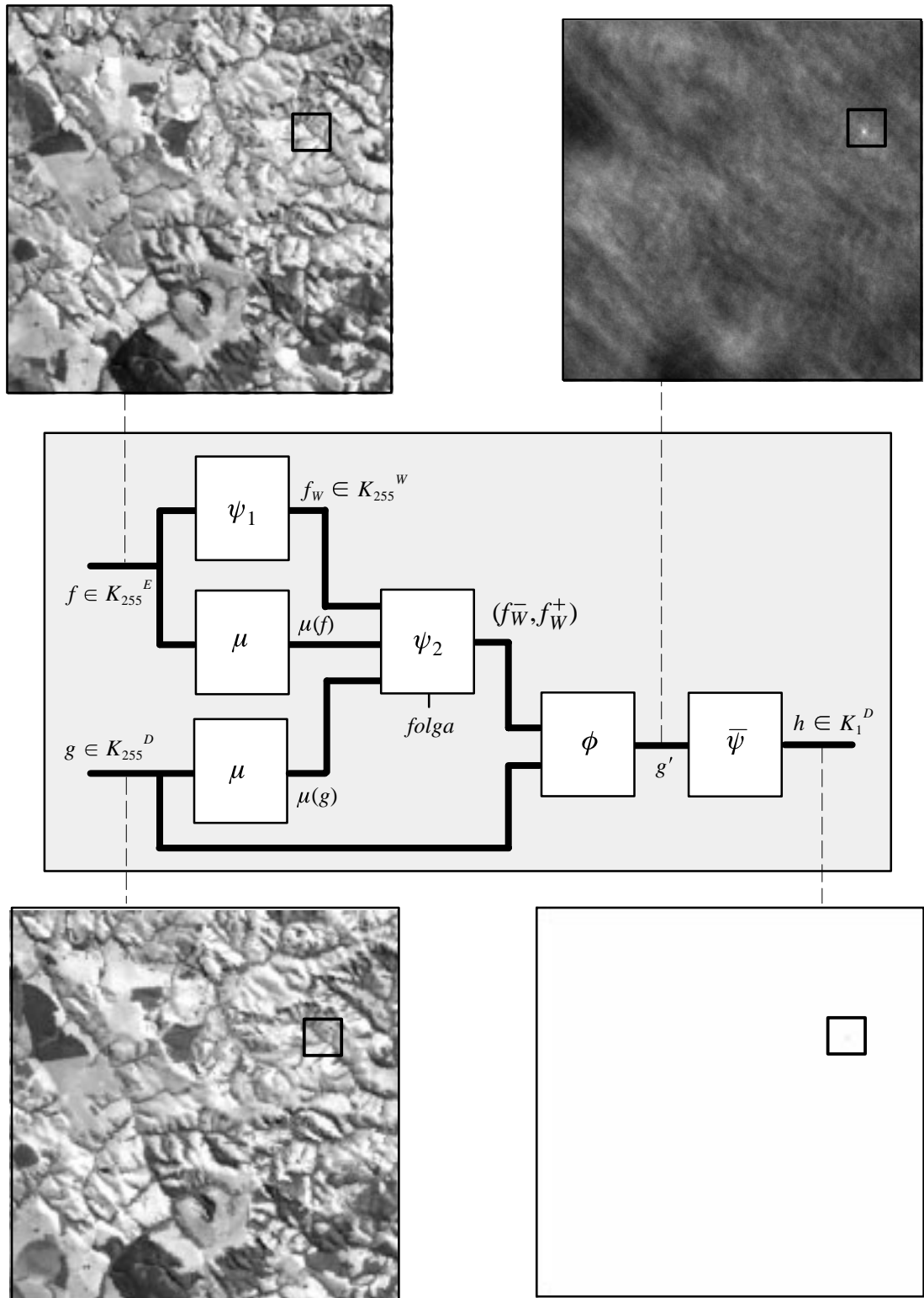


Fig. 5.3 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens TM/90_1 (IR) e TM/94_1 (IP) – padrão 51x51 de IR centrado em (284,120) – folga = 15).

Com relação a posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa, pode-se observar na Tabela 5.2 que ambos os métodos apresentam desempenho semelhante, encontrando o padrão desejado em alguns casos, e em outros numa posição deslocada de 1 pixel da posição desejada. Os centros dos padrões desejados da coluna “Padrão Desejado em IP” desta tabela dados por (col,lin), foram determinados visualmente sobre a imagem pelo operador humano.

Os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5 ilustram o comportamento do OMCP e do MSDA no Experimento 1, para o padrão de IR centrado em (241,37) e com folga (15, 30 e 45). Estes gráficos são elaborados a partir das imagens g' , geradas neste experimento, da seguinte forma:

- toma-se como referência para a normalização a imagem g' resultante da aplicação do OMCP com folga 15;
- normaliza-se linearmente as imagens g' resultantes da aplicação do OMCP com folgas 30 e 45 e do MSDA, ajustando seus mínimos e máximos com o mínimo e o máximo da imagem g' de referência, respectivamente;
- extrai-se das imagens g' normalizadas e de referência as linhas horizontais contendo o pixel correspondente ao centro do padrão encontrado por estes métodos;
- gera-se os respectivos gráficos a partir dos dados das linhas extraídas no passo anterior.

Portanto, estes gráficos representam os perfis das imagens g' ao longo destas linhas, onde no eixo vertical os valores correspondentes ao nível de similaridade encontram-se normalizados conforme exposto acima.

A Figura 5.4 ilustra o comportamento do OMCP com relação a variação do parâmetro “folga” (15, 30 e 45) e com relação ao MSDA.

Na Figura 5.5 é ilustrado, além do comportamento do OMCP (onde o parâmetro “folga” é igual a 15) com relação ao MSDA, o comportamento de ambos os métodos com relação às suas médias.

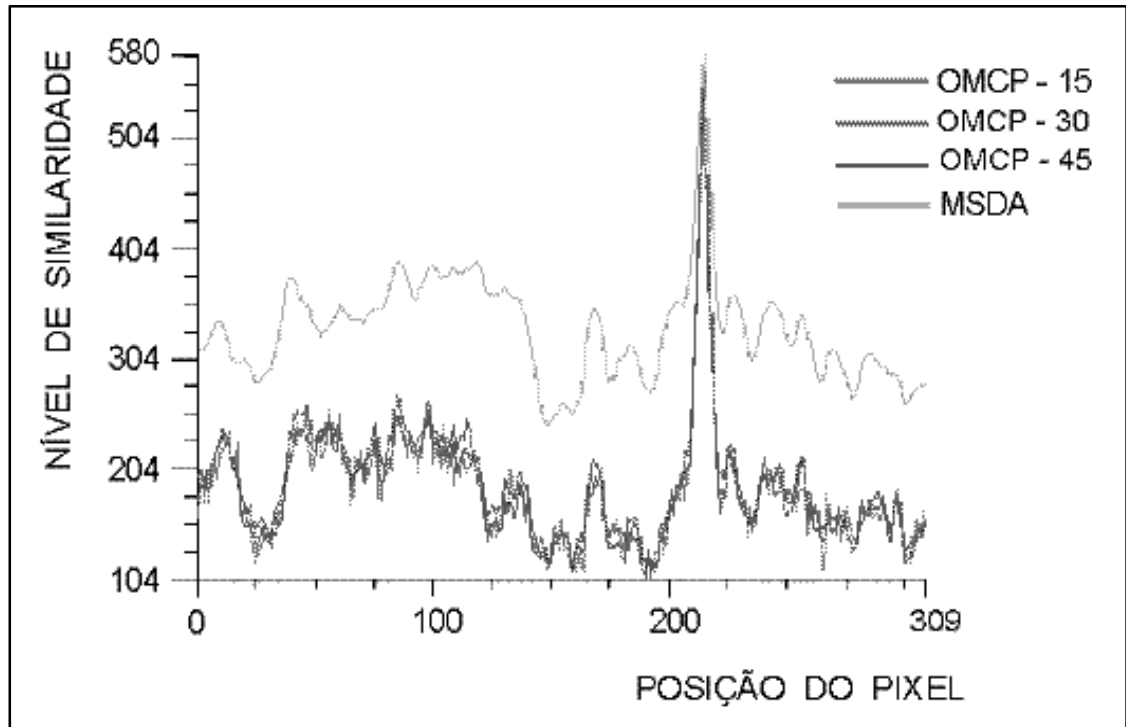


Fig. 5.4 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (241,37) na imagem TM/90_1 (IR) – folga = 15, 30 e 45).

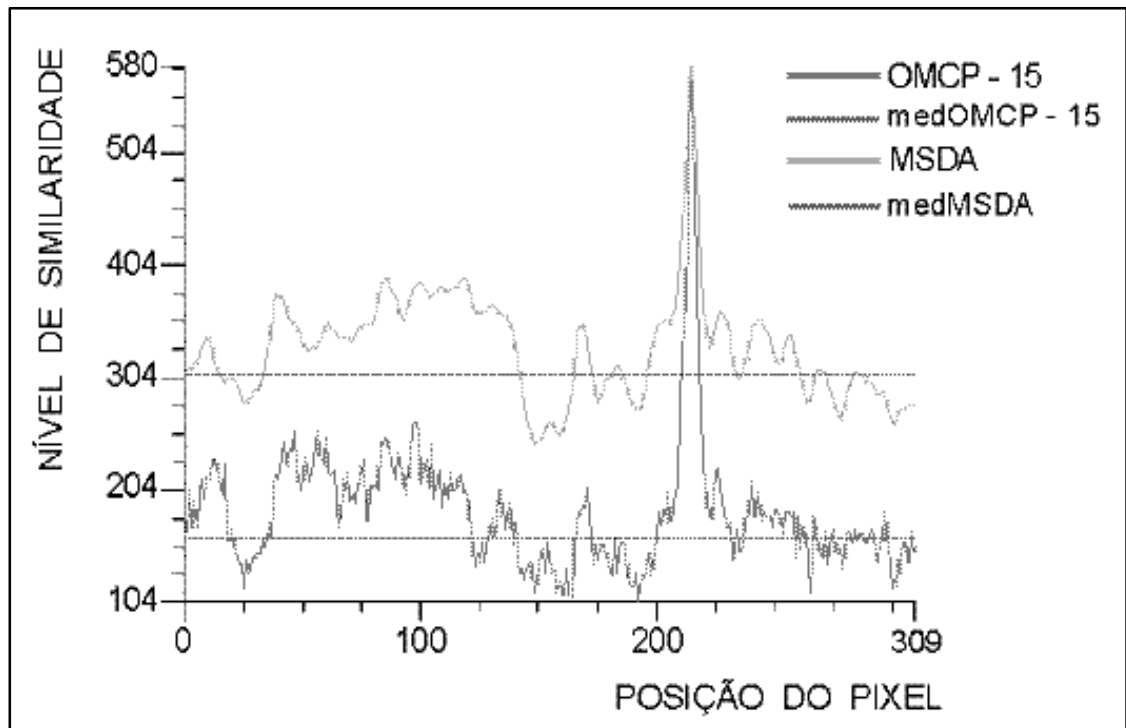


Fig. 5.5 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação as suas médias (padrão 51x51 centrado em (241,37) na imagem TM/90_1 (IR) – folga = 15).

Nas Figuras 5.4 e 5.5, pode-se observar que nos gráficos referentes as aplicações do OMCP os pontos de máximo global se destacam melhor dos demais pontos do que no gráfico referente à aplicação do MSDA (isto é, eles apresentam um pico mais acentuado).

Nos gráficos da Figura 5.5 pode-se observar também, através do comportamento dos métodos OMCP e MSDA com relação às suas médias, que o ponto de máximo global está mais distante da reta que representa a média da imagem produzida pelo OMCP do que da reta que representa a média da imagem produzida pelo MSDA. Isto pode ser observado também na Tabela 5.2, através do item “diferença relativa”, (Capítulo 4 – Seção 4.6), onde o OMCP apresenta índices mais altos que o MSDA.

5.3.2 – EXPERIMENTO 2

No Experimento 2 são utilizadas as imagens TM/90_2 (IR) e TM/94_2 (IP). Com estas imagens são realizados onze experimentos com o OMCP, conforme o esquema ilustrado pela Figura 5.1.

Nestes experimentos são escolhidos três padrões na imagem de referência pelo operador humano, a serem encontrados na imagem de pesquisa, e são utilizadas as “folgas” conforme apresentadas na Tabela 5.3, para cada padrão escolhido. A Tabela 5.3 apresenta também os padrões utilizados neste experimento.

TABELA 5.3 – PARÂMETROS DO EXPERIMENTO 2

Imagem de Referência (IR): TM/90_2 – 400x400		
Padrão em IR		Folga
Tamanho da Janela (col,lin)	Centro do Padrão (col,lin)	
51x51	(75,47)	15
		30
		45
51x51	(345,212)	15
		30
		45
		50
		80
51x51	(47,268)	15
		30
		45

A Figura 5.6 ilustra de forma esquemática a aplicação do OMCP, para o padrão 51x51, centrado na posição (47,268) na imagem de referência e utilizando uma folga igual a 30. Nesta figura os quadrados sobre as imagens f , g , g' e h , indicam o seguinte: na imagem f , a região do padrão de referência a ser encontrado na imagem g ; e nas imagens g , g' e h , a região do padrão correspondente ao padrão de referência, ou seja, na imagem g a região do padrão desejado e nas imagens g' e h a região do padrão encontrado como sendo correspondente ao padrão de referência.

Neste experimento é aplicado também o MSDA, conforme o esquema ilustrado na Figura 5.2, utilizando-se os mesmos padrões e imagens da aplicação do OMCP.

A Tabela 5.4 mostra os resultados do Experimento 2, que consiste na posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa pelo OMCP e MSDA, e uma medida do comportamento (diferença relativa, definida no Capítulo 4 – Seção 4.6) destes métodos com relação as suas médias. Nesta tabela os centros dos padrões desejados da coluna “Padrão Desejado em IP”, dados por (col,lin), foram determinados visualmente sobre a imagem de pesquisa pelo operador humano.

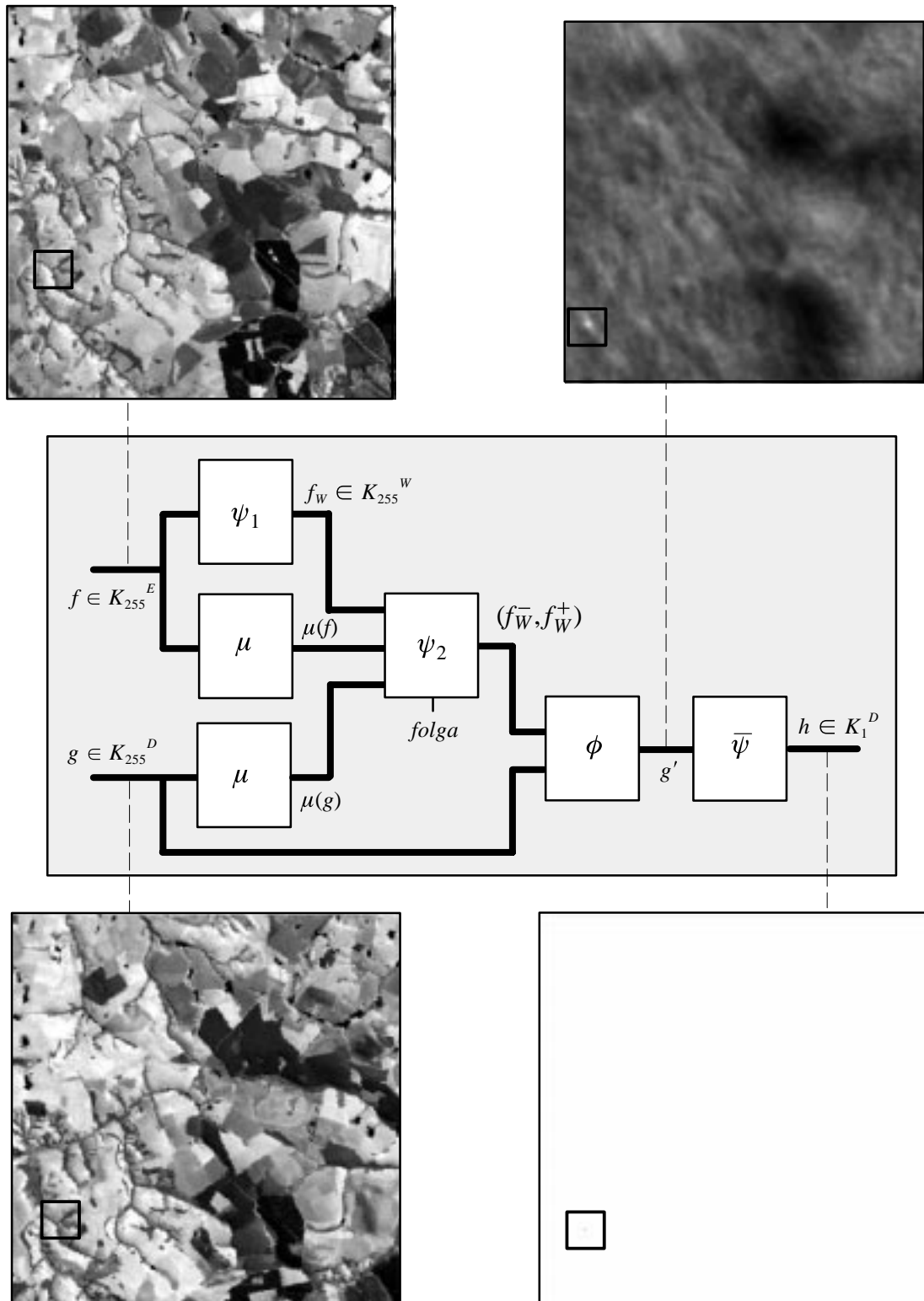


Fig. 5.6 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens TM/90_2 (IR) e TM/94_2 (IP) – padrão 51x51 de IR centrado em (47,268) – folga = 30).

TABELA 5.4 – RESULTADOS DO EXPERIMENTO 2

CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS EM NÍVEIS DE CINZA									
Imagem de Referência (IR): TM/90_2 – 400x400 – de 09/09/90									
Imagem de Pesquisa (IP): TM/94_2 – 400x400 – de 18/07/94									
Padrão em IR		Padrão Desejado em IP	Centro do Padrão Encontrado em IP						
			Operador Morfológico de Casamento de Padrões(OMCP)				Método da Soma das Diferenças Absolutas (MSDA)		
Tam. Jan. (colxlin)	Centro do Padrão (col,lin)	Centro do Padrão (col,lin)	Folga	Nº Max. Cond.	(col,lin)	Dif. Relativa	Min. SDA	(col,lin)	Dif. Relativa
51x51	(75,47)	(74,97)	15	574	(75,97)	0,75	81364	(75,97)	0,50
			30	1077	(75,97)	0,73			
			45	1458	(75,97)	0,71			
51x51	(345,212)	(344,262)	15	462	(39,101)	0,70	98578	(344,262)	0,45
			30	847	(34,105)	0,67			
			45	1070	(35,105)	0,64			
			50	1171	(344,262)	0,63			
			80	1582	(344,262)	0,58			
51x51	(47,268)	(47,318)	15	540	(47,317)	0,67	58462	(47,318)	0,45
			30	1133	(47,318)	0,68			
			45	1552	(47,318)	0,66			

Com relação a posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa, pode-se observar na Tabela 5.4 que ambos os métodos apresentam desempenho semelhante, encontrando exatamente o padrão desejado em alguns casos e em outros, numa posição deslocada de 1 pixel da posição desejada; e para as folgas 15, 30 e 45 na aplicação do OMCP para o padrão centrado em (345,212) são encontrados padrões que não correspondem a este padrão.

Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 ilustram o comportamento do OMCP e do MSDA no Experimento 2, para o padrão de IR centrado em (75,47) e com folga (15, 30 e 45). Estes gráficos são elaborados a partir das imagens g' , geradas neste experimento, de forma semelhante aos gráficos do Experimento 1 (Seção 5.3.1). Portanto, eles representam os perfis das imagens g' ao longo da linha horizontal que contém o pixel correspondente ao centro do padrão encontrado por estes métodos.

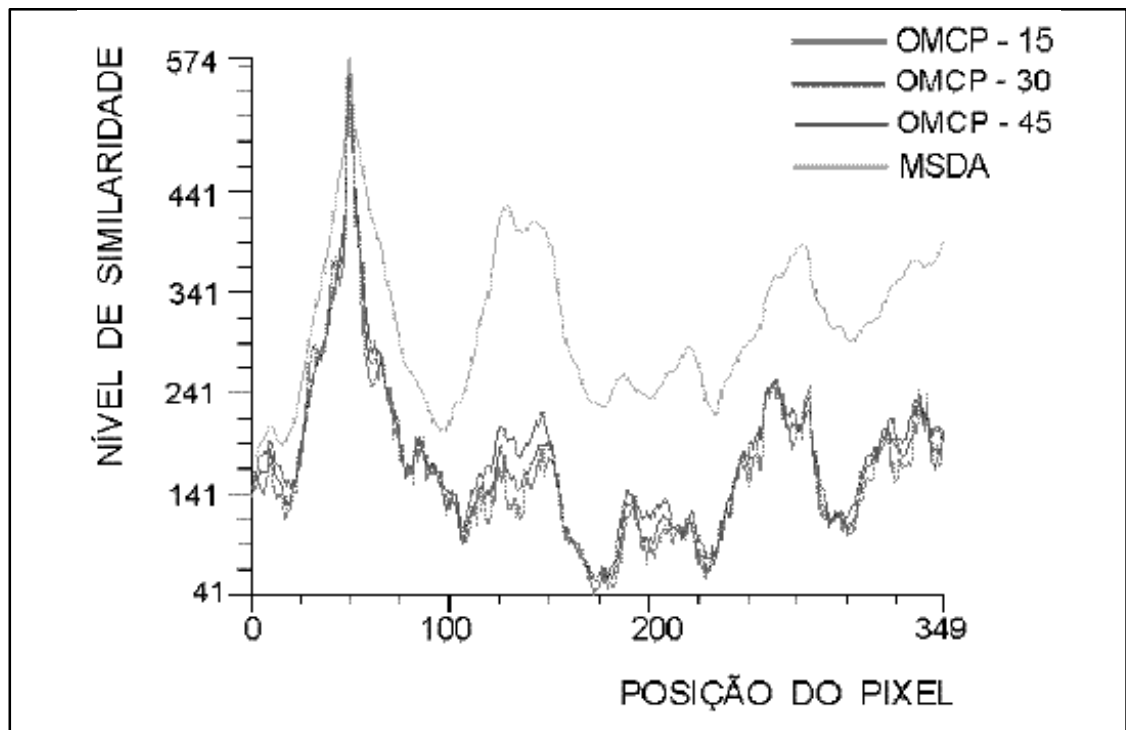


Fig. 5.7 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (75,47) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15, 30 e 45).

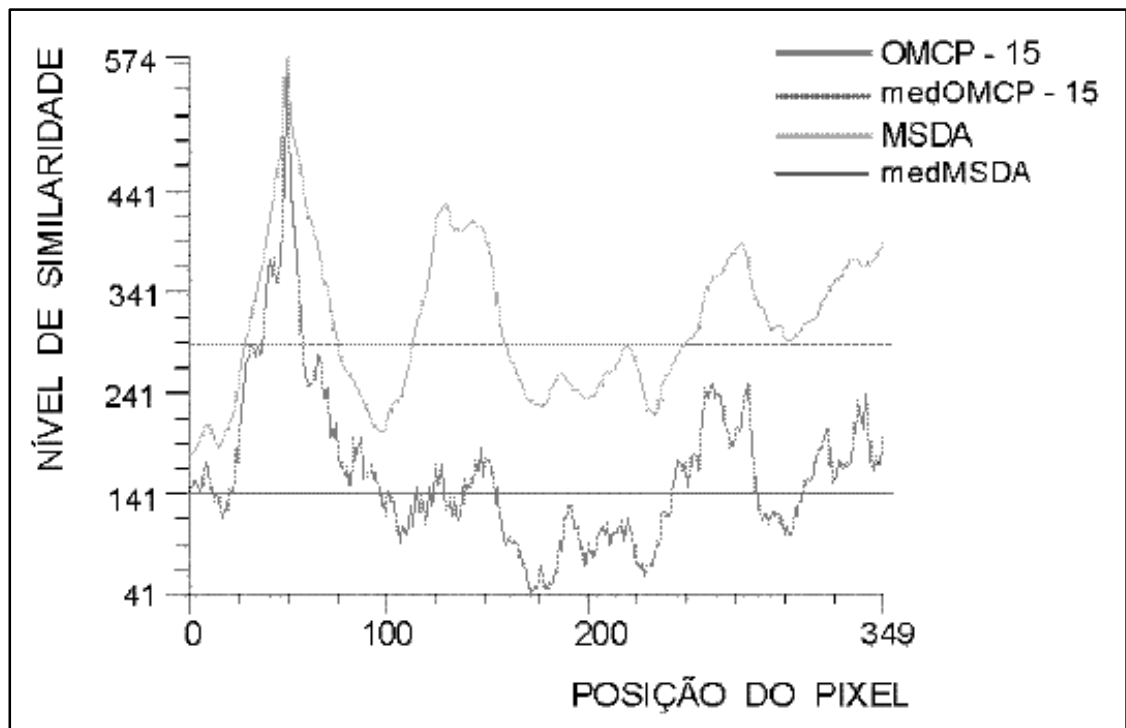


Fig. 5.8 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação às suas médias (padrão 51x51 centrado em (75,47) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15).

A Figura 5.7 ilustra o comportamento do OMCP com relação a variação do parâmetro “folga” (15, 30 e 45) e com relação ao MSDA.

Na Figura 5.8 é ilustrado, além do comportamento do OMCP (onde o parâmetro “folga” é igual a 15) com relação ao MSDA, o comportamento de ambos os métodos com relação as suas médias.

Nas Figuras 5.7 e 5.8, pode-se observar que nos gráficos referentes as aplicações do OMCP os pontos de máximo global se destacam melhor dos demais pontos do que no gráfico referente a aplicação do MSDA (isto é, eles apresentam um pico mais acentuado).

Nos gráficos da Figura 5.8 pode-se observar também, através do comportamento dos métodos OMCP e MSDA com relação as suas médias, que o ponto de máximo global está mais distante da reta que representa a média da imagem produzida pelo OMCP do que da reta que representa a média da imagem produzida pelo MSDA. Isto pode ser observado também na Tabela 5.4, através do item “diferença relativa” (Capítulo 4 – Seção 4.5), onde o OMCP apresenta índices mais altos que o MSDA.

A Figura 5.9 ilustra o resultado da aplicação do OMCP, para o padrão 51x51, centrado na posição (345,212) na imagem de referência e utilizando uma folga igual a 15, onde o padrão desejado em (344,262) não é encontrado, mas sim um padrão em (39,101) que na realidade não corresponde ao padrão de referência (veja Tabela 5.4). Nesta figura os quadrados sobre as imagens indicam o seguinte: na imagem TM/90_2 (Figura 5.9a), a região do padrão de referência a ser encontrado na imagem TM/94_2 (Figura 5.9b); na imagem TM/94_2 a região do padrão desejado correspondente ao padrão de referência, que não foi encontrado pelo OMCP, e a região do padrão encontrado.

Os gráficos das Figuras 5.10 e 5.11 ilustram o comportamento do OMCP e do MSDA no Experimento 2, para o padrão de IR centrado em (345,212) e com folga (15, 30 e 50).

A Figura 5.10 ilustra o comportamento do OMCP com relação a variação do parâmetro “folga” (15, 30 e 50) e com relação ao MSDA. Nesta figura tem-se um exemplo

do comportamento do OMCP, no qual este método não encontra o padrão desejado com as folgas 15 e 30; mas encontra com a folga igual 50 e com o MSDA. Pode-se observar também nesta figura, que o picos referentes aos pontos de máximo global dos gráficos são mais acentuados nos gráficos referentes ao OMCP, principalmente naquele onde a folga é igual a 50 e que o padrão desejado é encontrado. Estes gráficos são elaborados a partir das imagens g' , geradas neste experimento, de forma semelhante aos gráficos do Experimento 1 (Seção 5.3.1). Portanto, eles representam os perfis das imagens g' ao longo de uma linha horizontal.

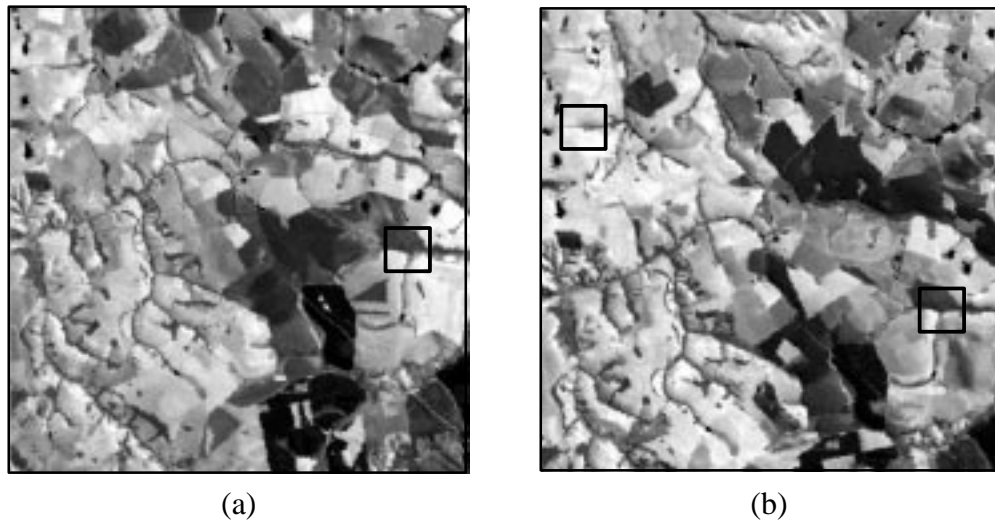


Fig. 5.9 – Padrão desejado x padrão encontrado pelo OMCP. (a) imagem TM/90_2 (IR) com padrão 51x51 centrado em (345,212). (b) imagem TM/94_2 (IP) com padrão desejado em (344,262) e encontrado em (39,101) – folga = 15.

A Figura 5.11 mostra um exemplo do comportamento do OMCP, no mesmo experimento da Figura 5.10, para o padrão desejado e o padrão encontrado, quando estes são bem distintos quanto as suas localizações. Para isto, foram extraídas as duas linhas horizontais da imagem g' , gerada neste experimento, que contêm os pixels correspondentes aos centros do padrão desejado e do padrão encontrado por este método, ou seja, os gráficos representam os perfis de g' ao longo destas linhas.

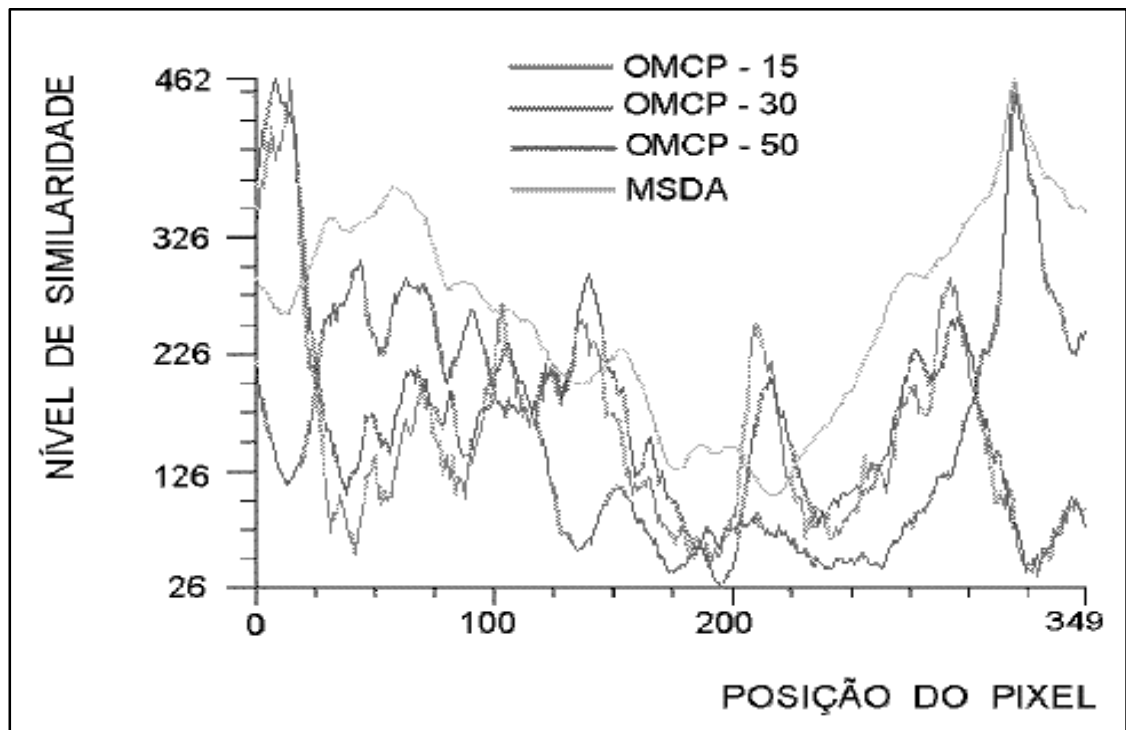


Fig. 5.10 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 51x51 centrado em (345,212) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15, 30 e 50).

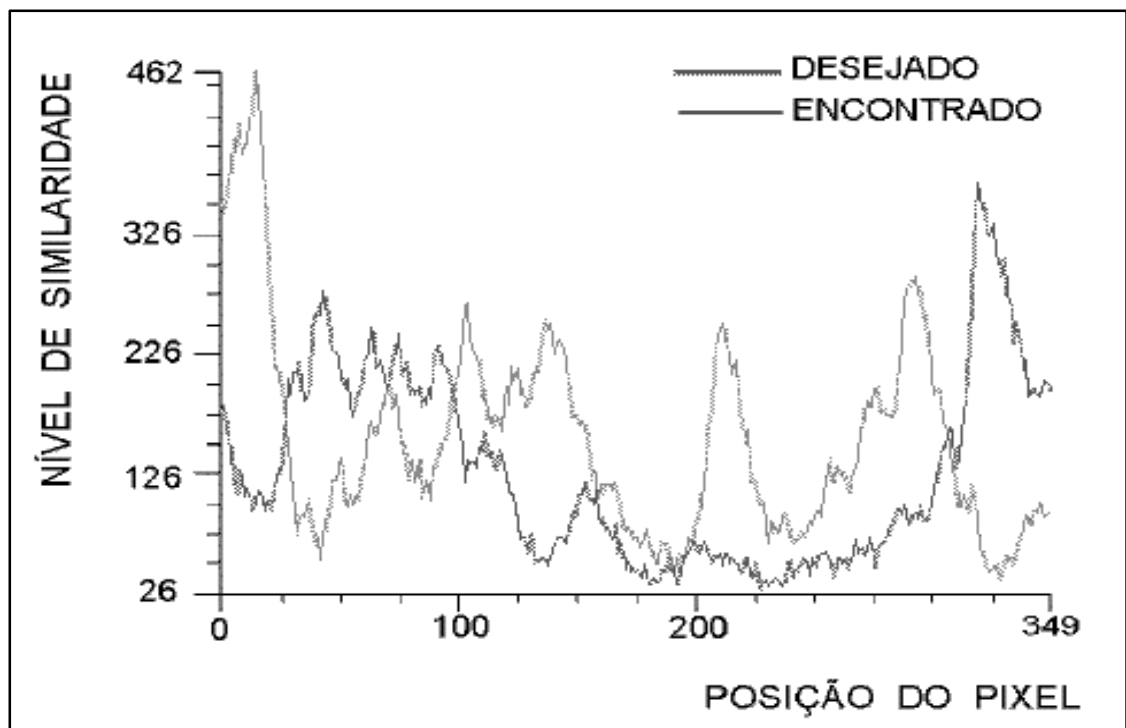


Fig. 5.11 – Comportamento do OMCP para o padrão desejado e o encontrado (padrão 51x51 centrado em (345,212) na imagem TM/90_2 (IR) – folga = 15).

5.3.3 – EXPERIMENTO 3

No Experimento 3 são utilizadas as imagens F62 e F63. Com estas imagens são realizados doze experimentos com o OMCP, conforme o esquema ilustrado pela Figura 5.1. Nestes experimentos são escolhidos quatro padrões na imagem de referência pelo operador humano, a serem encontrados na imagem de pesquisa, e são utilizadas as “folgas” apresentadas na Tabela 5.5, para cada padrão escolhido. A Tabela 5.5 apresenta também os padrões utilizados neste experimento.

TABELA 5.5 – PARÂMETROS DO EXPERIMENTO 3

Imagem de Referência (IR): Foto 62 – 300x300 – de 08/04/76		
Padrão em IR		Folga
Tamanho da Janela (colxlin)	Centro do Padrão (col,lin)	
15x15	(233,45)	38
		46
		54
15x15	(48,99)	38
		46
		54
31x31	(251,116)	38
		46
		54
15x15	(97,222)	38
		46
		54

A Figura 5.12 ilustra de forma esquemática a aplicação do OMCP, para o padrão 15x15, centrado na posição (233,45) na imagem de referência e utilizando uma folga igual a 38. Nesta figura os quadrados sobre as imagens f , g , g' e h , indicam o seguinte: na imagem f , a região do padrão de referência a ser encontrado na imagem g ; e nas imagens g , g' e h , a região do padrão correspondente ao padrão de referência, ou seja, na imagem g a região do padrão desejado e nas imagens g' e h a região do padrão encontrado como sendo correspondente ao padrão de referência.

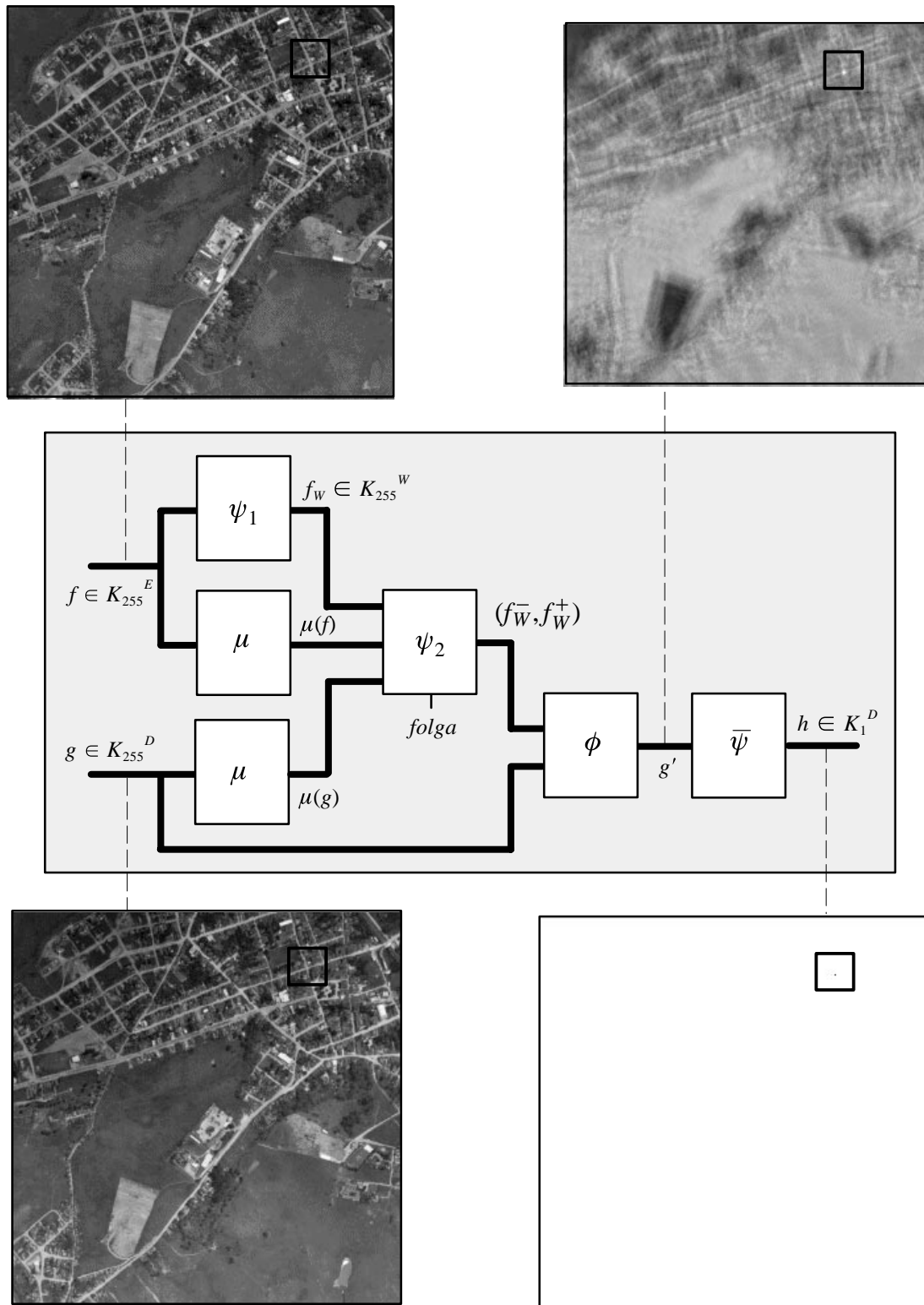


Fig. 5.12 – Representação esquemática do casamento de padrões pelo OMCP (imagens F62 (IR) e F63 (IP) – padrão 15x15 de IR centrado em (233,45) – folga = 38).

Neste experimento é aplicado também o MSDA, conforme o esquema ilustrado na Figura 5.2, utilizando-se os mesmos padrões e imagens da aplicação do OMCP.

A Tabela 5.6 mostra os resultados do Experimento 3, que consiste na posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa pelo OMCP e MSDA, e uma medida do comportamento (diferença relativa, definida no Capítulo 4 – Seção 4.6) destes métodos com relação as suas médias. Nesta tabela os centros dos padrões desejados da coluna “Padrão Desejado em IP”, dados por (col,lin), foram determinados visualmente sobre a imagem de pesquisa pelo operador humano.

TABELA 5.6 – RESULTADOS DO EXPERIMENTO 3

CASAMENTO DE PADRÕES EM IMAGENS EM NÍVEIS DE CINZA									
Imagem de Referência (IR): F62 – 300x300 – de 08/04/76									
Imagem de Pesquisa (IP): F63 – 300x300 – de 08/04/76									
Padrão em IR		Padrão Desejado em IP	Centro do Padrão Encontrado em IP						
			Operador Morfológico de Casamento de Padrões (OMCP)				Método da Soma das Diferenças Absolutas (MSDA)		
Tam. Jan. (colxlin)	Centro do Padrão (col,lin)	Centro do Padrão (col,lin)	Folga	Nº Max. Cond.	(col,lin)	Dif. Relativa	Min. SDA	(col,lin)	Dif. Relativa
15x15	(233,45)	(225,44)	38	159	(225,44)	0,48	3344	(226,44)	0,31
			46	175	(226,44)	0,43			
			54	186	(226,44)	0,40			
15x15	(48,99)	(46,76)	38	168	(46,77)	0,47	2941	(46,77)	0,29
			46	190	(46,77)	0,43			
			54	197	(46,77)	0,39			
31x31	(251,116)	(237,113)	38	549	(237,113)	0,48	20820	(203,181)	0,31
			46	614	(105,167)	0,44			
			54	679	(199,179)	0,42			
15x15	(97,222)	(84,200)	38	220	(84,200)	0,44	1234	(84,200)	0,32
			46	223	(84,200)	0,41			
			54	225	(84,201)	0,36			

Com relação a posição do padrão encontrado na imagem de pesquisa, pode-se observar na Tabela 5.6 que ambos os métodos apresentam desempenho semelhante, encontrando exatamente o padrão desejado em alguns casos, e em outros numa posição des-

locada de 1 pixel da posição desejada. Porém, para o padrão de IR centrado em (251,116), o MSDA não encontra o padrão desejado, enquanto que, o OMCP encontra este padrão somente para uma das três folgas utilizadas, a folga igual a 38.

A Figura 5.13 ilustra o resultado da aplicação do OMCP, para o padrão 31x31, centrado na posição (251,116) na imagem de referência e utilizando uma folga igual a 46, onde o padrão desejado (237,113) não é encontrado, mas sim um padrão em (105,167) que na realidade não corresponde ao padrão de referência (veja Tabela 5.6). Nesta figura os quadrados sobre as imagens indicam o seguinte: na imagem F62 (Figura 5.13a), a região do padrão de referência a ser encontrado na imagem F63 (Figura 5.13b); na imagem F63 (Figura 5.13b) a região do padrão desejado correspondente ao padrão de referência, que não foi encontrado pelo OMCP, e a região do padrão encontrado.

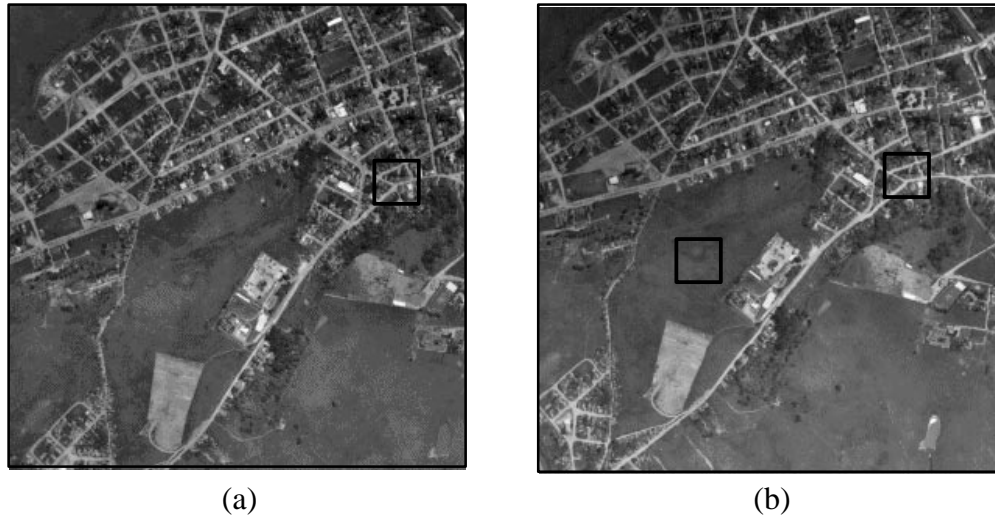


Fig. 5.13 – Padrão desejado x padrão encontrado pelo OMCP. (a) imagem F62 (IR) com padrão 31x31 centrado em (251,116). (b) imagem F63 (IP) com padrão desejado em (237,113) e encontrado em (105,67) – folga = 46.

Os gráficos das Figuras 5.14 e 5.15 ilustram o comportamento do OMCP e do MSDA no Experimento 3, para o padrão de IR centrado em (233,45) e com folga (38, 46 e 54). Estes gráficos são elaborados a partir das imagens g' , geradas neste experimento, de forma semelhante aos gráficos do Experimento 1 (Seção 5.3.1). Portanto, eles representam os perfis das imagens g' ao longo da linha horizontal que contém o pixel correspondente ao centro do padrão encontrado por estes métodos.

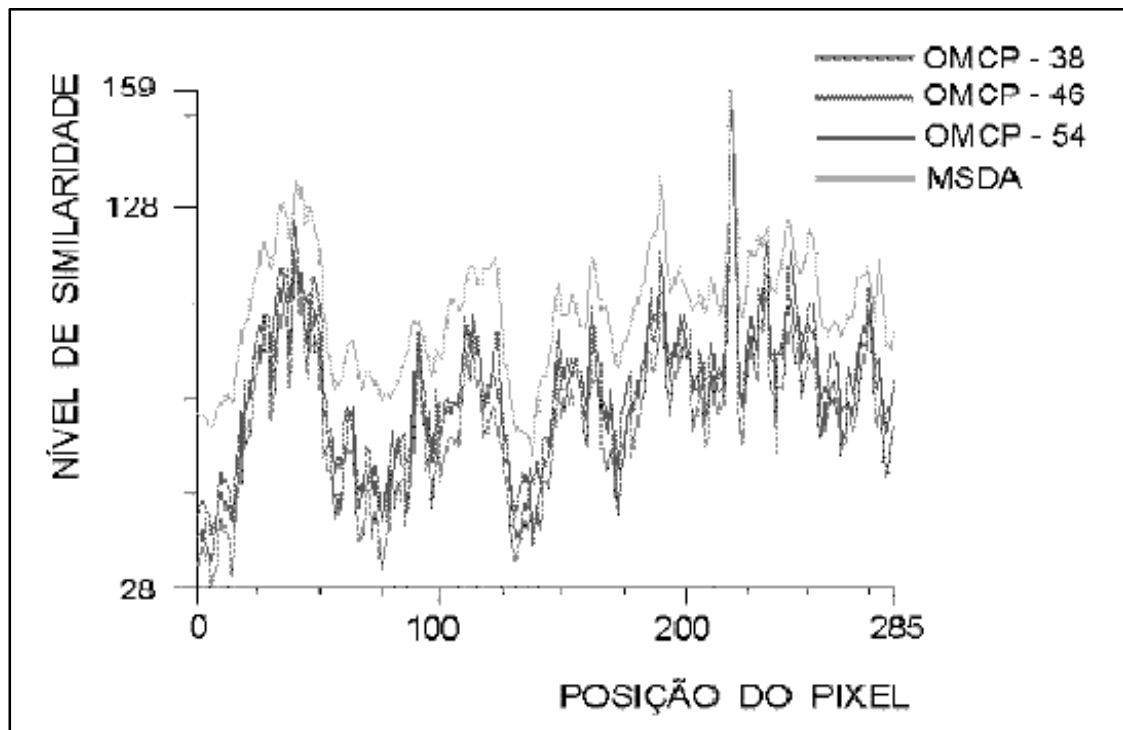


Fig. 5.14 – Comportamento do OMCP e do MSDA (padrão 15x15 centrado em (233,45) na imagem F62 (IR) – folga = 38, 46 e 54).

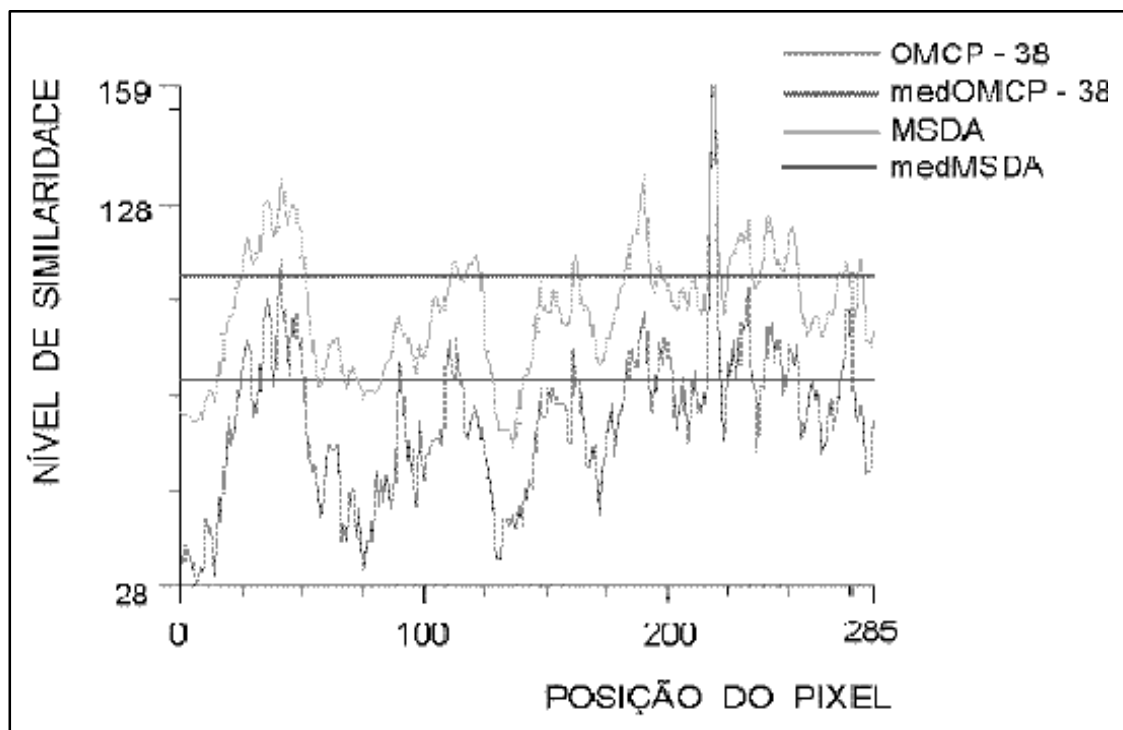


Fig. 5.15 – Comportamento do OMCP e do MSDA com relação as suas médias (padrão 15x15 centrado em (233,45) na imagem F62 (IR) – folga = 38).

A Figura 5.14 ilustra o comportamento do OMCP com relação a variação do parâmetro “folga” (38, 46 e 54) e com relação ao MSDA.

Na Figura 5.15 é ilustrado, além do comportamento do OMCP (onde o parâmetro “folga” é igual a 38) com relação ao MSDA, o comportamento de ambos os métodos com relação as suas médias.

Nas Figuras 5.14 e 5.15, nos gráficos referentes as aplicações do OMCP os pontos de máximo global se destacam melhor dos demais pontos do que no gráfico referente a aplicação do MSDA (isto é, eles apresentam um pico mais acentuado).

Nos gráficos da Figura 5.15 pode-se observar também, através do comportamento dos métodos OMCP e MSDA com relação as suas médias, que o ponto de máximo global está mais distante da reta que representa a média da imagem produzida pelo OMCP do que da reta que representa a média da imagem produzida pelo MSDA. Isto pode ser observado também na Tabela 5.6, através do item “diferença relativa” (Capítulo 4 – Seção 4.6), onde o OMCP apresenta índices mais altos que o MSDA.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação foi proposto um operador de casamento de padrões em imagens em níveis de cinza. E para este operador foi apresentada uma representação morfológica, por meio da composição do operador de localização do máximo global com o operador de casamento inexato (Capítulo 4 – Seção 4.3).

O operador proposto foi implementado no sistema *Khoros* (Apêndice A) por meio da linguagem de programação visual *Cantata* (Apêndice A). Para esta implementação foram utilizadas três rotinas implementadas pelo autor deste trabalho (baseadas nos algoritmos do Capítulo 4 – Seção 4.5) e mais algumas rotinas já existentes no sistema *Khoros*.

Para testar o operador de casamento de padrões proposto, foram realizados alguns experimentos (apresentados no Capítulo 5) com imagens de sensoriamento remoto (imagens TM/Landsat e fotografias aéreas digitalizadas). Os resultados destes experimentos (Capítulo 5) foram analisados, permitindo uma avaliação global do método proposto.

A introdução dos parâmetros de “deslocamento” e “folga”, apresentados no Capítulo 4, nos padrões de referência procuram compensar as diferenças radiométricas existentes entre as imagens de referência e de pesquisa. Porém, só esta compensação pode não ser suficiente para encontrar o padrão correspondente. Desta forma, o OMCP considera como sendo o padrão correspondente aquele padrão que é mais similar ao padrão de referência, ou seja, o padrão (delimitado por uma janela) que contém o maior número de “condições” satisfeitas quando a imagem é percorrida.

Com base nos experimentos realizados e nos resultados obtidos (Capítulo 5) pode-se dizer que com relação ao parâmetro “folga”, introduzido nos padrões de referência, que uma vez introduzida uma folga que possibilita encontrar o padrão desejado o aumento dela não causa grandes alterações no comportamento do OMCP, ou seja, não há ganho na qualidade dos resultados. Contudo, a dificuldade está em saber a priori a partir de

que valor para este parâmetro o padrão desejado poderá ser encontrado. Neste trabalho o parâmetro “folga” é definido empiricamente pelo operador humano.

Um outro ponto a destacar é com relação ao comportamento do OMCP com relação ao MSDA, pois com base nos gráficos mostrados no Capítulo 5 pode-se dizer que o OMCP encontra o ponto de casamento com menor ambiguidade que o MSDA. Porém, somente com testes realizados e as medidas de comportamento efetuadas ainda não se pode afirmar que o OMCP sempre apresentará um desempenho melhor que o MSDA.

O objetivo deste trabalho foi atingido e pode-se dizer que o método proposto apresenta resultados satisfatórios. Porém, é possível introduzir melhorias, principalmente na implementação do algoritmo, de forma que o operador humano possa selecionar também uma área de pesquisa, menor que a imagem de pesquisa e maior que o padrão de referência, onde certamente o padrão desejado se encontra, reduzindo assim o tempo de processamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Ballard, D. H.; Brown, C. M. Matching. In: _____ **Computer vision**. New Jersey, Prentice Hall, 1982. cap. 11, p. 352–382.
- Banon, G. J. F. **Characterization of translation-invariant elementary morphological operators between gray-level images**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995. (INPE 5616–RPQ/671).
- Banon, G. J. F. **Medida do comportamento dos métodos OMCP e MSDA – diferença relativa**. São José dos Campos, novembro de 1996. Comunicação pessoal.
- Banon, G. J. F. **Morphological decomposition of the image operators for extreme gray-level computation and location**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997. No prelo
- Banon, G. J. F. Morphological decomposition of extreme gray-level location operators. In: Brazilian Workshop 97 on Mathematical Morphology, 1997, São José dos Campos, **Anais.**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997a. Disponível: site *inpe*. URL: <http://www.inpe.br/~banon/URLib/col/dpi.inpe.br/banon/1997/01.30.14.02/doc/tag.html>. Consultado em janeiro de 1997.
- Banon, G. J. F.; Barrera, J. Minimal representations for translation-invariant set mappings by morphology mathematical. **SIAM Journal Applied Mathematic**, **51**(6):1782–1798, Dec. 1991.
- Banon, G. J. F.; Barrera, J. Decomposition of mappings between complete lattices by mathematical morphology – part I: general lattices. **Signal Processing**, **30**(3):299–327, Feb. 1993.
- Banon, G. J. F.; Barrera, J. **Bases da morfologia matemática para análise de imagens binárias**. IX Escola de Computação, Recife, julho de 1994. 248 p.
- Barnea, D. I.; Silverman, H. F. A class of algorithms for fast digital image registration. **IEEE Transactions on Computers**, **21**(2):179–186, Feb. 1972.
- Barrera, J. **Uma abordagem unificada para os problemas de processamento digital de imagens: a morfologia matemática**. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. (INPE 4311–TDL/278).
- Barrera, J. **Uma abordagem unificada para problemas de visão computacional: a morfologia matemática**. (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. (INPE 5391–TAE/012).

- Bethel, D. J. Digital image processing in photogrammetry. **Photogrammetric Record**, **13**(76):494–504, Oct. 1990.
- Bins, L. S. **Uso do casamento estrutural para registro de imagens de satélite.** (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988. (INPE 4734–TDL/345).
- Brown, L. G. A survey of image registration techniques. **ACM Computing Surveys**, **24**(4):325–376, Dec. 1992.
- Djamdji, J. P.; Bijaoui, A.; Maniere, R. Geometrical registration of images: the multiresolution approach. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **59**(5):645–653, May 1993.
- Erthal, G. J. **Registro translacional de imagens: métodos correlacionais e sequenciais.** (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985. (INPE 3456–TDL/189).
- Flusser, J.; Suk, T. A moment–based approach to registration of images with affine geometric distortion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **32**(2):382–387, Mar. 1994.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. **Digital image processing.** Massachusetts, Addison Wesley, 1992.
- Goshtasby, A. Template matching in rotated images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **7**(3):338–344, May 1985.
- Goshtasby, A.; Stockman, G. C. Point pattern matching using convex hull edges. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, **15**(5):631–637, Sept./Oct. 1985.
- Greenfeld, J. S.; Schenk, A. F. Experiment with edge–based matching. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **55**(12):1771–1777, Dec. 1989.
- Haala, N; Vosselman, G. Recognition of road and river patterns by relational matching. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 17., Washington D. C., USA, 1992. Comission III, **Archives.**, Washington D. C., ISPRS, 1992. v.29, B3, p. 969–975.
- Hannah, M. J. Digital stereo image matching techniques. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 16., Kyoto, Japan, 1988. Comission III, **Archives.**, Kyoto, ISPRS, 1988. v.27, B3, p. 280–293.
- Hannah, M. J. A system for digital stereo image matching. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **55**(12):1765–1770, Dec. 1989.

- Haralick, R. M.; Sternberg, S. R.; Zhuang, X. Image analysis using mathematical morphology. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **9**(4):532–550, July 1987.
- Heijmans, H. J. A. M. Theoretical aspects of gray-level morphology. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **13**(6):568–582, June 1991.
- Hellwich, O.; Faig, W. Graph-based matching of stereo image features. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 17., Washington D. C., USA, 1992. Commission III, **Archives.**, Washington D. C., ISPRS, 1992. v.29, B3, p. 307–317.
- Hsieh, Y. C.; McKeown Jr., D. M.; Perlant, F. P. Performance evaluation of scene registration and stereo matching for cartographic feature extraction. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **14**(2):214–238, Feb. 1992.
- Jain, A.K. **Fundamentals of digital image processing**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1989.
- Lemmens, M. J. P. M. A survey on stereo matching techniques. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 16., Kyoto, Japan, 1988. Commission V, **Archives.**, Kyoto, ISPRS, 1988. v.27, B8, p. V.11–V.23.
- Li, X.; Dubes, R. C. The first stage in two-stage template matching. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **7**(6):700–707, Nov. 1985.
- Li, M. High precision relative orientation using the feature based matching techniques. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 16., Kyoto, Japan, 1988. Commission III, **Archives.**, Kyoto, ISPRS, 1988. v.27, B3, p. 456–465.
- Maragos, P. Optimal morphological approaches to image matching and object detection. In: International Conference on Computer Vision, 2., 1988, p. 695–699.
- Mascarenhas, N. D. A.; Velasco, F. R. D. **Processamento digital de imagem**. 2 ed., Rio de Janeiro, MCT/INPE, 1989.
- Medioni, G.; Nevatia, R. Matching images using linear features. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **6**(6):675–685, Nov. 1984.
- Moik, J. G. **Digital processing of remotely sensed images**. Washington, DC, NASA, 1980. 330 p.
- Shapiro, L. G.; Haralick, R. M. Structural descriptions and inexact matching. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **3**(5):504–519, Sept. 1981.

- Serra, J. **Image analysis and mathematical morphology**. London, Academic Press, 1982.
- Schneider, F.; Hahn, M. Matching images of different geometric scale. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 17., Washington D. C., USA, 1992. Commission III, **Archives.**, Washington D. C., ISPRS, 1992. v.29, B3, p. 295–302.
- Sternberg, S. Grayscale morphology. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, **46**(3):333–355, Sept. 1986.
- Ton, J.; Jain, A. K. Registering landsat images by point matching. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **27**(5):642–651, Sept. 1989.
- Torlegard, A. K. I. Sensors for photogrammetric mapping: review and prospect. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, **47**(4):241–262, June 1992.
- Toth, C. K.; Schenk, T. On matching image patches under various geometrical constraints. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 17., Washington D. C., USA, 1992b. Commission III, **Archives.**, Washington D. C., ISPRS, 1992. v.29, B3, p. 400–403.
- Toth, C. K.; Schenk, T. Feature-based matching for automatic image registration. **ITC Journal**, **1**:40–46, 1992a.
- Vanderbrug, G. J.; Rosenfeld, A. Two-stage template matching. **IEEE Transactions on Computers**, **26**(4):700–707, Apr. 1977.
- Ventura, A. D.; Rampini, A.; Schettini, R. Image registration by recognition of corresponding structures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **28**(3):305–314, May 1990.
- Wilson, S. S. Training structuring elements in morphological networks. In: Dougherty, E. R., ed. **Mathematical Morphology in Image Processing**. New York, Marcel Dekker, 1993. 530 p. cap.1, p.1–41.

APÊNDICE A

KHOROS E CANTATA

O *Khoros* é um ambiente de integração e desenvolvimento de software que enfatiza o processamento da informação e a exploração de dados. O objetivo do software *Khoros* é oferecer um ambiente completo de desenvolvimento de aplicações, ou seja, incluir todos os integrantes de um projeto, da aplicação feita pelo usuário final a infraestrutura para programação. Este sistema foi criado no Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade do Novo México, Albuquerque – EUA.

Todos os programas de processamento de informação e visualização no *Khoros* estão disponíveis via a linguagem de programação visual denominada *Cantata*. A *Cantata* é uma linguagem visual, expressa graficamente por fluxo de dados. O fluxo de dados é um procedimento no qual um programa visual é descrito como um grafo direcionado, onde cada nó representa um operador ou função, e cada arco representa um caminho sobre o qual os dados fluem.

No *Cantata* os ícones (denominados por *glyphs*) representam os programas do sistema *Khoros*. Cada um dos programas de processamento e visualização de dados no sistema *Khoros* pode ser representado na linguagem visual *cantata* como *glyphs*. Para criar um programa visual *cantata*, o usuário seleciona os programas desejados (e estruturas de controle, quando necessárias), coloca os *glyphs* correspondentes no espaço de trabalho (*workspace*) do *Cantata*, e conecta este *glyphs* para indicar o fluxo de dados de programa para programa, formando uma rede dentro do espaço de trabalho. Estes espaços de trabalho podem ser executados, "salvados" e recuperados para serem utilizados novamente ou alterados.

Para os "desenvolvedores" de aplicações, o sistema do *Khoros Toolbox Programmer* consiste de serviços de programação e ferramentas de desenvolvimento de software que suportam todos os aspectos de desenvolvimento da nova engenharia e aplicações científicas. O ambiente de desenvolvimento de software oferece ao programador possibilidade de manipulação gráfica direta de ferramentas para projetos de interface com o usuário, geração automática de código, documentação padronizada e gerenciamento de configuração interativo.