

3

O método híbrido

3.1

Princípio do método proposto

3.1.1

Método híbrido em um passo

O algoritmo de localização de pontos homólogos proposto acrescenta ao método de mínimos quadrados com crescimento de região um mecanismo automático que substitui o trabalho do operador humano de fornecer sementes sempre que o avanço do mecanismo de busca na imagem pára. O esquema mostrado no lado esquerdo da figura 3.1 apresenta as etapas do método manual para estabelecer correspondências nas imagens. Requer-se a intervenção do operador sempre que houver áreas não atingidas pelo crescimento de região. Denominamos cobertura a área da superfície atingida pelo mapa de correspondências.

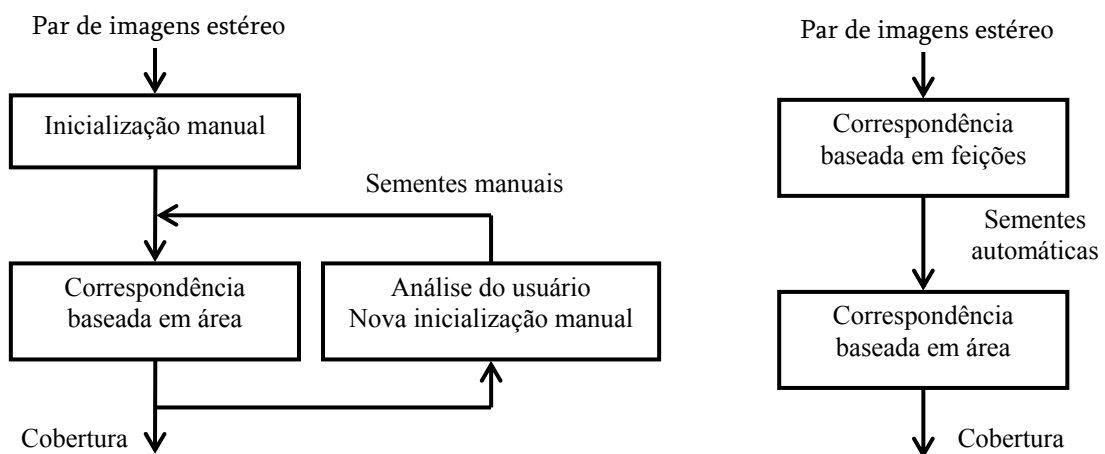


Figura 3.1: Comparação do método manual e do método híbrido em um passo

O esquema da direita na figura 3.1 mostra o princípio básico do método proposto, em um passo. Primeiro, utiliza-se um método baseado em feições para gerar um repositório de sementes. Em seguida, um programa de correspondências baseado em área parte de uma dessas sementes, e a cada vez que uma barreira é

encontrada na imagem impedindo que o crescimento de região progrida, o processo recomeça a partir de uma nova semente retirada do repositório. Essas barreiras aparecem onde há grandes diferenças nas imagens correspondentes, sejam elas causadas pelo deslocamento devido ao relevo ou por outras razões. Muitos métodos baseados em feições poderiam ser utilizados para este fim (por exemplo, os cantos de Harris [8]). Nessa dissertação utilizou-se o SIFT. O processo completo pode ser descrito pelos cinco passos seqüenciais, a saber:

- i) Aplicar o SIFT de modo a produzir um repositório de sementes;
- ii) Utilizar aleatoriamente uma semente do repositório;
- iii) Executar o método de mínimos quadrados com crescimento de região a partir da semente escolhida pelo passo anterior até que o processo pare;
- iv) Remover do repositório todas as sementes que se localizam sobre a área coberta no passo anterior;
- v) Repetir os passos ii) até iv) até que o repositório seja esvaziado.

Nessa primeira estratégia em um passo do método proposto, a correspondência de feições (o SIFT) não possui nenhum conhecimento das imagens antes de calcular os pontos homólogos.

3.1.2

Método híbrido em 2 passos

Para melhorar o desempenho do programa, propõe-se também uma estratégia em dois passos, como ilustrado pela figura 3.2. Cada passo é composto por uma correspondência baseada em feições e uma baseada em áreas, só que o primeiro passo é realizado de maneira ingênua, sem nenhuma informação sobre a imagem, enquanto o segundo passo já utiliza informações colhidas no primeiro passo, que serão detalhadas mais adiante. Seja no primeiro ou no segundo passo, a correspondência baseada em área segue exatamente o mesmo esquema, mas com um conjunto de sementes diferente. Somente a correspondência baseada em feições é modificada entre os dois passos, porque seu papel é bem diferente e porque utiliza no segundo passo informações resultantes da aplicação do primeiro passo..

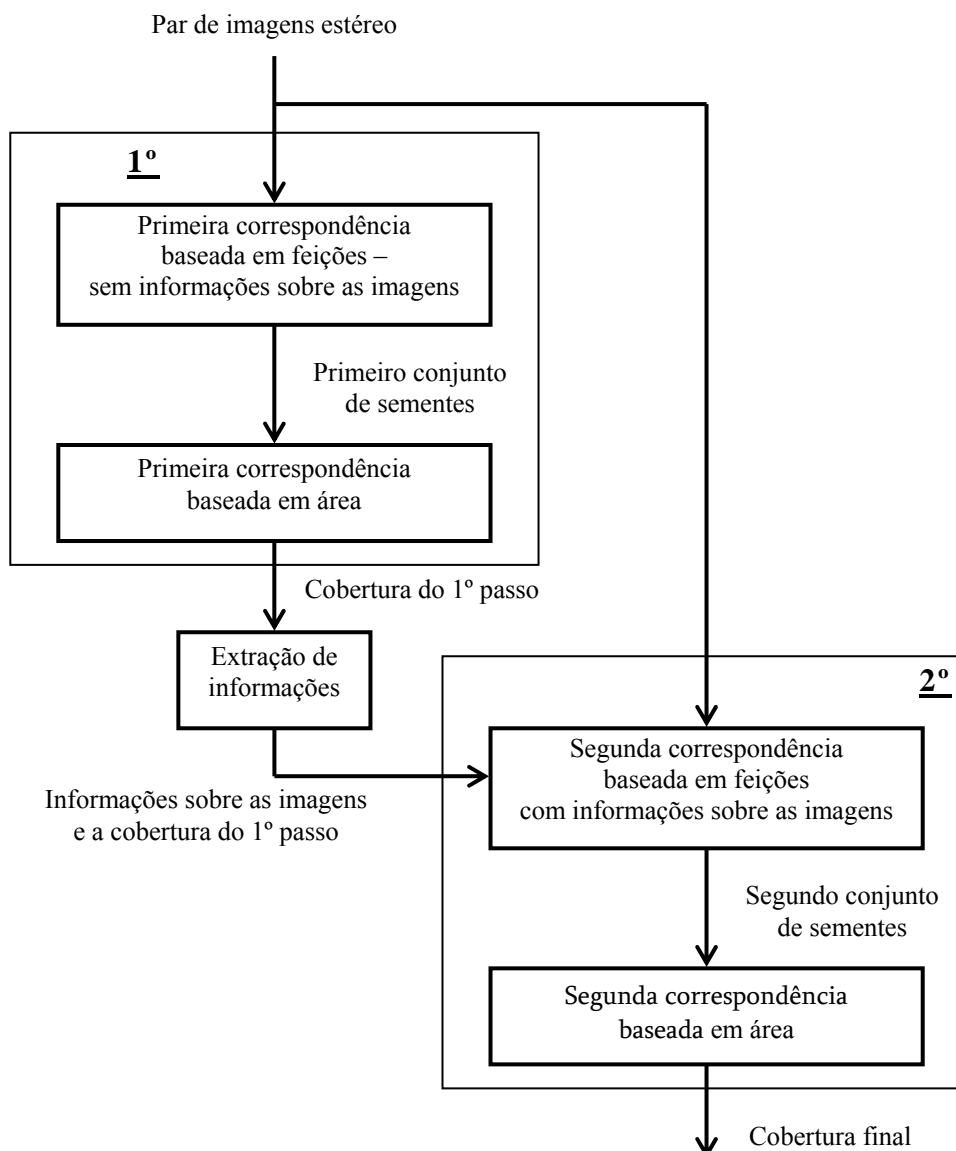


Figura 3.2: Método híbrido de localização dos pontos homólogos em 2 passos

3.2

Detalhe do método híbrido em um passo

O primeiro método híbrido proposto contém um passo, ou seja duas etapas, o que pode ser suficiente para algum tipo de imagens. Antes de detalhar essas etapas, cabe ressaltar uma característica relacionada à homogeneidade do deslocamento relativos pontos homólogos nas imagens aéreas e de satélite, que será utilizada de diversas formas nos procedimentos a seguir.

3.2.1

Homogeneidade dos deslocamentos dos pontos homólogos

3.2.1.1

Descrição da homogeneidade dos deslocamentos

Nas duas vistas de um par estéreo de imagens aéreas e de satélite, fora alguns objetos como carros ou sombras que se mexem, encontram-se quase os mesmos elementos (tetos de casa, ruas, barreiras, piscinas, ...) com pequenos deslocamentos, diferentes em função das suas próprias elevações. Nas posições da imagem em que esses deslocamentos se alteram bruscamente, ocorre o bloqueio do processo de crescimento de região,. Isto ocorre especialmente na vizinhança de prédios altos, onde os tetos são muito deslocados em comparação ao chão. Contudo, haverá, sempre consistência entre todas as correspondências encontradas.

Seja $A_1 = (x_1, y_1)$ um ponto da primeira imagem cujo ponto homólogo $B_1 = (x'_1, y'_1)$ na segunda imagem foi identificado. É razoável admitir que o homólogo $B_2 = (x'_2, y'_2)$ de outro ponto $A_2 = (x_2, y_2) = (x_1 + x_0, y_1 + y_0)$ da primeira imagem estará próximo de $X = (x'_1 + x_0, y'_1 + y_0)$. Devido à descontinuidade nos deslocamentos, B_2 não deve ser encontrado exatamente em X , mas no interior de um disco D com centro em X e de raio R , ou seja $B_2 \in D(X, R)$, como ilustrado na figura 3.3. Esta particularidade das imagens aéreas e de satélite será chamada de homogeneidade de deslocamento, e será utilizada no algoritmo de duas maneiras.

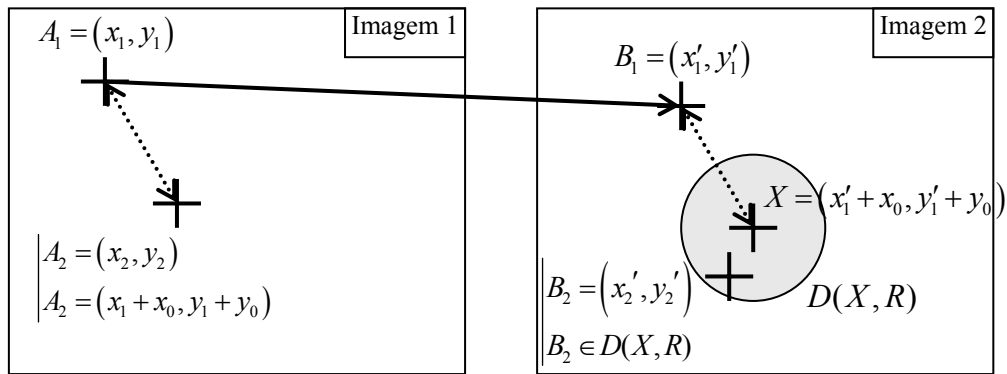


Figura 3.3: Ilustração da homogeneidade de deslocamento entre as correspondências em duas imagens

3.2.1.2

Utilização da homogeneidade dos deslocamentos a posteriori

Uma forma de utilizar o critério de homogeneidade de deslocamento *a posteriori*, consiste em eliminar todas as correspondências encontradas que não a respeitam, como ilustrado na figura 3.4. Os pontos homólogos, encontrados no par de imagens justapostas, são ligados por linhas brancas. Estas linhas devem ter direção e comprimento aproximadamente iguais. Nota-se na figura que este padrão se verifica para todas as linhas, com exceção de uma que cruza as demais na figura. Esta correspondência deve ser rejeitada como falsa.

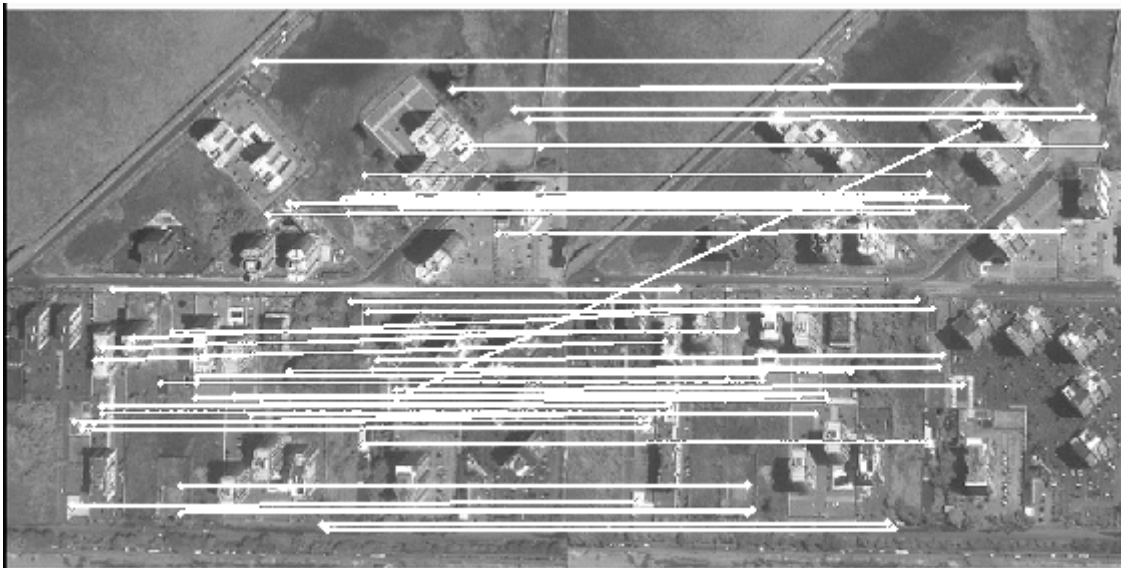


Figura 3.4: Exemplo de correspondência onde a homogeneidade não é respeitada

Nesse objetivo, depois de ter calculado todas as correspondência no par de imagens e obtidos os pontos $A_i = (x_i, y_i)$ na primeira imagem, homólogos respectivamente dos pontos $B_i = (x'_i, y'_i)$ na segunda, para $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, calcula-se o vetor mediana $\Delta \vec{M}$ dos deslocamentos de A_i para B_i :

$$\Delta \vec{M} = \begin{bmatrix} \Delta M_x \\ \Delta M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{mediana}_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} (x'_i - x_i) \\ \text{mediana}_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} (y'_i - y_i) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Em seguida, eliminam-se todos os pares de pontos homólogos (A_k, B_k) cujos deslocamentos não satisfazem às duas condições:

$$\begin{cases} |(x'_k - x_k) - \Delta M_x| \leq \delta M \\ |(y'_k - y_k) - \Delta M_y| \leq \delta M \end{cases} \quad (3.2)$$

ou, de modo equivalente

$$\max \left(|(x'_k - x_k) - \Delta M_x|, |(y'_k - y_k) - \Delta M_y| \right) \leq \delta M \quad (3.3)$$

onde δM é um limiar escolhido pelo operador. Um par de pontos é eliminado se o vetor deslocamento correspondente não estiver num quadrado de lado $2 \times \delta M$ em torno da mediana dos deslocamentos).

Essa restrição utilizando a homogeneidade *a posteriori* pode ser utilizada em qualquer correspondência, já que ela não precisa de nenhuma informação sobre as imagens. Será utilizada na correspondência das feições no método híbrido em um passo, ou no primeiro passo do método híbrido em dois passos.

3.2.1.3

Utilização da homogeneidade dos deslocamentos *a priori*

Se já forem conhecidas as localizações de alguns pontos correspondentes entre as duas imagens (que serão chamados de “referência”), é possível utilizar a propriedade de homogeneidade dos deslocamentos para estimar, para qualquer ponto da primeira imagem, a região na segunda onde encontrar o seu homólogo. Essa restrição de homogeneidade dos deslocamentos *a priori* pode ser utilizada na correspondência dos SIFT do segundo passo do método híbrido em dois passos, quando a primeira correspondência baseada em feições (ver figura 3.2) já

forneceu um conjunto de pontos de referência. Além de se reduzir o número de falsos pareamentos, melhora-se a eficiência computacional, porque a janela de busca dos pontos homólogos fica reduzida.

A figura 3.5 ilustra o princípio do algoritmo proposto. Dispõe-se de vários pontos de referência $A_r = (x_r, y_r)$, representados com cruzes +, cujos homólogos $B_r = (x_r, y_r)$ na segunda imagem são conhecidos. Para localizar o correspondente a um novo ponto da primeira imagem (o “x” à esquerda), localizam-se primeiramente os cinco pontos de referência mais próximos a ele na primeira imagem, no caso A_i, A_j, A_k, A_l e A_m , e seus correspondentes na segunda imagem B_i, B_j, B_k, B_l e B_m . Calcula-se então a média dos deslocamentos de cada um destes pontos a seu homólogo, ou seja,

$$\left\langle \overline{A_n B_n} \right\rangle_{n \in \{i, j, k, l, m\}} = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} \sum_{n \in \{i, j, k, l, m\}} (x'_n - x_n) \\ \sum_{n \in \{i, j, k, l, m\}} (y'_n - y_n) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Procura-se enfim o homólogo $B(x', y')$ do ponto $A(x, y)$ num disco $D(P, \delta H)$, de centro $P = A + \left\langle \overline{A_n B_n} \right\rangle_{n \in \{i, j, k, l, m\}}$ e de raio δH a ser escolhido pelo operador. Esse disco é representado na imagem da direita da figura 3.5 em torno do ponto P .

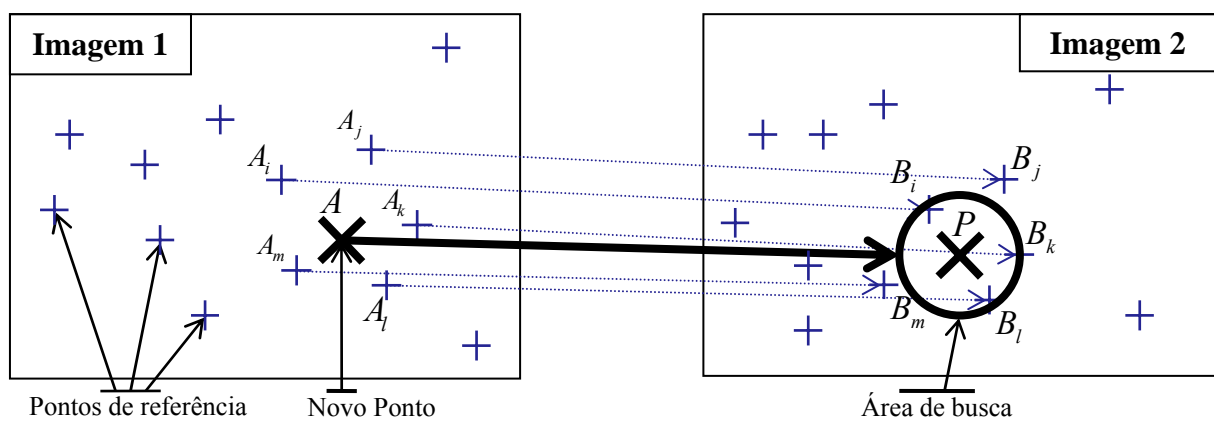


Figura 3.5: Restrição na área de busca com uso da homogeneidade dos deslocamentos *a priori*

O uso da restrição de homogeneidade dos deslocamentos *a priori* é ilustrado também na figura 3.6 com os 812 pontos de referência de uma imagem de 500×500 pixels, onde as coordenadas correspondem aos eixos da figura. O

deslocamento médio dos 5 vizinhos mais próximos de um novo ponto (a cruz “+” na imagem da esquerda) foi calculado. O seu homólogo tem que ser procurado, no caso dentro de um disco de raio igual a 40 pixels desenhado na imagem à direita, o que reduz muito a área de procura e aumenta a eficiência do algoritmo.

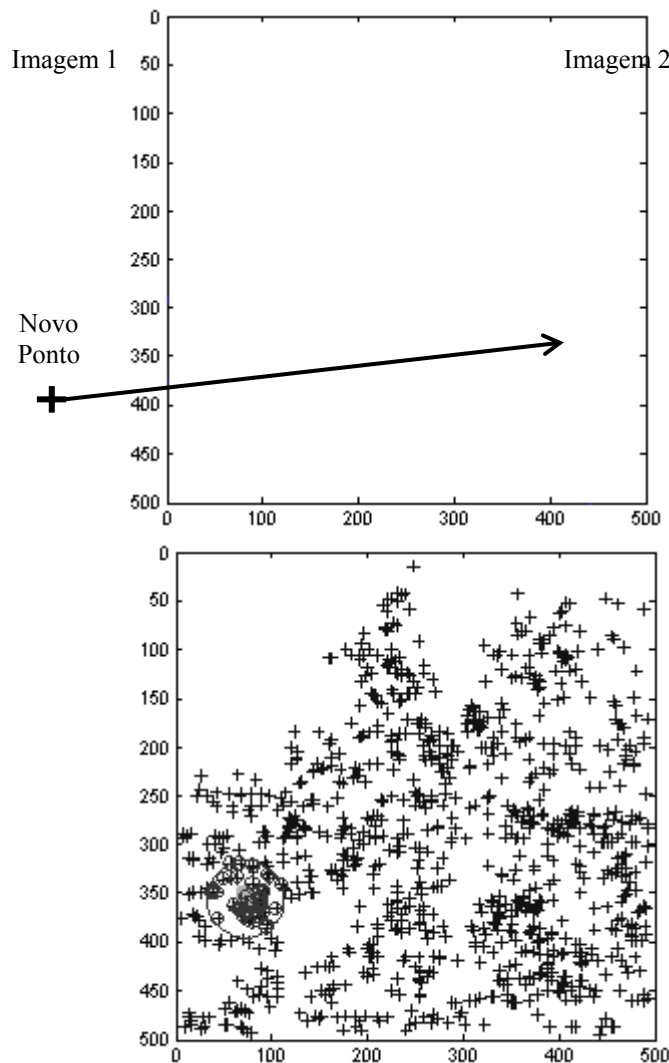


Figura 3.6: Restrição da área de busca com uma imagem de 500×500 pixels

3.2.2

Análise da correspondência baseada em feições

A primeira etapa do método híbrido em um passo é uma correspondência baseada em feições, calculada sem informação sobre as imagens. Seu papel é fornecer sementes, preferencialmente bastante espalhadas nas imagens, para que o procedimento de crescimento de região que se seguirá possa cobrir toda a superfície de ambas as imagens. Utiliza-se o método do SIFT detalhado no

capítulo 2 dessa dissertação e em [2], mas com uma modificação na etapa da correspondência dos pontos chave, de modo a incluir a restrição de homogeneidade dos deslocamentos explicada na seção precedente. Assim, uma terceira restrição é adicionada na correspondência às duas restrições presentes no algoritmo original. Assim, um par de pontos será considerado homólogo se :

- a distância euclidiana entre os descritores for menor do que um dado limiar, e,
- a menor distância euclidiana em relação à segunda menor distância for maior do que um segundo dado limiar, e,
- o módulo da diferença entre o deslocamento $\overrightarrow{AB} = \begin{bmatrix} x' - x \\ y' - y \end{bmatrix}$ e o deslocamento mediano for menor do que um terceiro dado limiar¹.

3.2.3

Análise da correspondência baseada em área

A segunda etapa do processo é uma correspondência baseada em área, que recebe o repositório de sementes do método baseado em feições e cresce a partir dele. Estudar essa parte do algoritmo, e mais especificamente sua exatidão, não é o foco dessa dissertação. Este trabalho se limita a verificar se o método é capaz de alcançar uma boa cobertura da imagem. Pode-se separar duas funções principais nessa etapa, ilustradas na figura 3.7 :

- Eliminar os pontos errados fornecidos pelo SIFT (se houver)
- Afinar as sementes boas e crescer até conseguir a melhor cobertura possível.

¹ $\overrightarrow{AB} = \begin{bmatrix} x' - x \\ y' - y \end{bmatrix}$ é o deslocamento do ponto $A(x, y)$ na primeira imagem para o seu homólogo $B(x', y')$ na segunda imagem, e a distância utilizada a norma 1 : $\|\overrightarrow{OP}\|_1 = \max(x_p - x_o, y_p - y_o)$, como precisado nas equações (3.2) e (3.3).

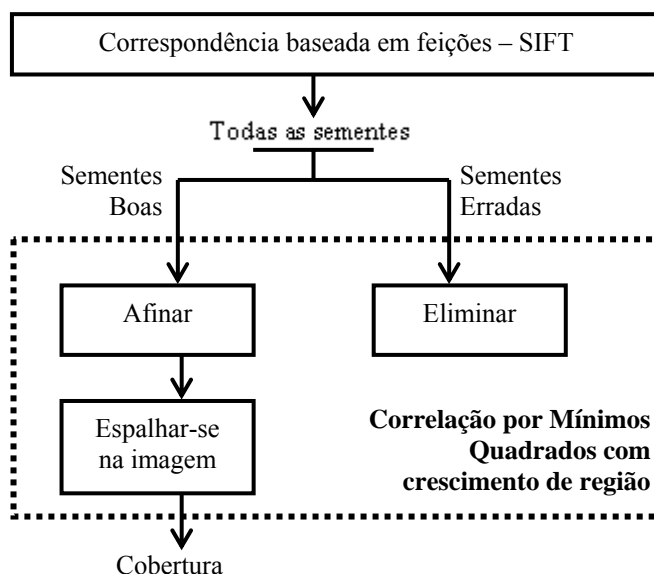


Figura 3.7: Funções realizadas pela correlação por mínimos quadrados e crescimento de região

3.3

Detalhamento do método híbrido em dois passos

3.3.1

Primeiro passo

As versões em um e dois passos do método híbrido têm o mesmo passo inicial, embora com papéis um pouco diferentes. Este passo não precisa fornecer diretamente uma boa cobertura, mas sim um conjunto de sementes confiáveis do qual seja possível obter informações seguras sobre as imagens. Os valores dos parâmetros em uma e outra versão podem por isso ser diferentes.

3.3.2

Extração de informações

Depois do primeiro passo, já existe um repositório de sementes que pode ser usado no crescimento de região, e também um primeiro mapa de pontos homólogos entre as duas imagens do par estéreo. Utilizam-se dois tipos de informações para melhorar o segundo passo :

- Redução da janela de busca utilizando a homogeneidade a priori (ver sub-seção 3.2.1.3) com o primeiro repositório de sementes servindo como pontos de referência.
- Restrição da busca de sementes nas áreas que não foram atingidas pelo crescimento de região, com o uso do que será chamado de “máscaras dos buracos”.

Cálculo das máscaras dos buracos

Via de regra, algumas áreas nas imagens não são atingidas pelo crescimento de região, e devem ser cobertas no segundo passo. É então criada uma máscara dos buracos depois do primeiro passo, como ilustrado na figura 3.8, que vai limitar as áreas onde a correspondência baseada em feições procura novas sementes, o que poupa processamento além de diminuir as chances de erro.

A partir da cobertura da primeira correlação por mínimos quadrados com o crescimento de região, obtém-se uma imagem binária do tamanho da imagem original com um “1” onde o ponto encontrou seu homólogo e um “0” onde não encontrou. Aplica-se à esta máscara uma operação de dilatação utilizando como elemento estruturante um quadrado de $2d+1$ pixels, onde d foi o passo utilizado na etapa de crescimento de região (vide seção 2.1.2.1). Desta forma cada ponto cujo homólogo tiver sido encontrado pela correlação cobrirá um quadrado de lado $2d+1$ pixels em torno dele.

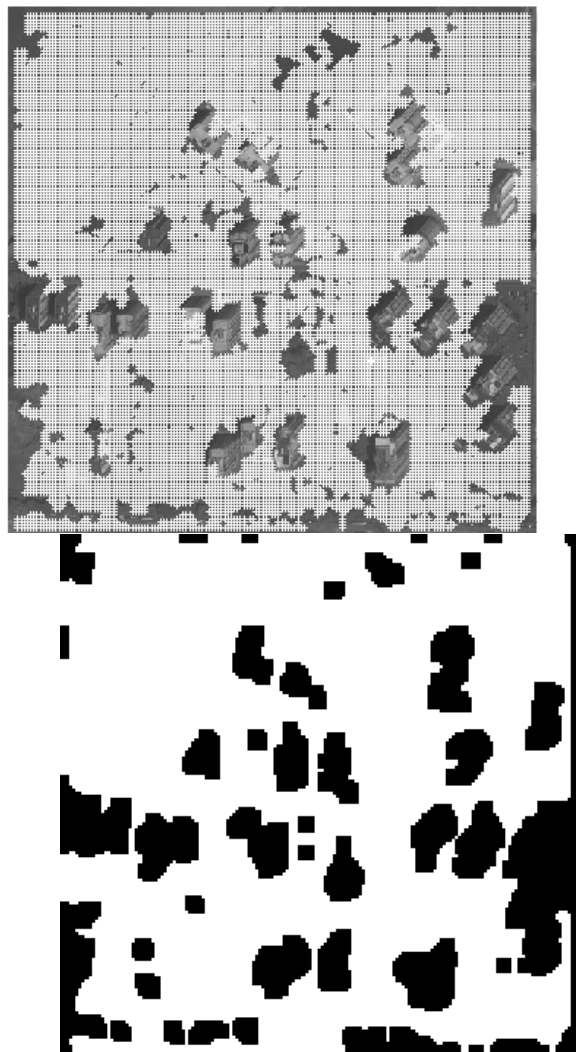


Figura 3.8: Esquerda - cobertura obtida com o crescimento de região – Direita - a máscara dos buracos

Aplica-se em seguida uma operação abertura na imagem com um disco de 8 pixels de raio como elemento estruturante², o que elimina os buracos muito pequenos da máscara. A figura 3.8 mostra à esquerda a cobertura obtida depois do crescimento de região aplicado numa imagem de 500 por 500 pixels onde aparecem alguns prédios não atingidos. Os “+” brancos indicam as áreas cobertas. Foi aplicada a abertura para conseguir a máscara da direita, onde só se encontram em preto os maiores buracos da imagem da esquerda. É nessas áreas pretas que o segundo passo do algoritmo vai procurar novas sementes.

² abertura = erosão seguida por uma dilatação

3.3.3

Segundo passo

O segundo passo do método híbrido em dois passos tem a mesma estrutura do primeiro, só que explora informações colhidas no primeiro passo. De fato, utiliza-se o mesmo SIFT, mas com duas melhorias :

- Só são calculados pontos chave dentro das áreas pretas da máscara dos buracos (ver seção 3.3.2)
- Só se procuram correspondentes desses pontos chave nas regiões previstas pela homogeneidade dos deslocamentos *a priori* (ver seção 3.2.1).

Desta forma, há neste passo menos pontos chave potenciais, e para cada um, há muito menos candidatos, pois já se tem uma idéia do lugar onde procurar. A correspondência é mais focalizada. Mas com esse número menor de candidatos, somente as duas restrições iniciais do SIFT são impostas, ou seja, um par de pontos será considerado homólogo se :

- a distância euclidiana entre os descritores for menor que um dado limiar, e,
- a menor distância euclidiana em relação à segunda menor distância for maior que um segundo dado limiar.

A segunda correspondência baseada em feições tem por objetivo fornecer sementes em todas as regiões não atingidas no primeiro passo.