



Yves Denis Heckel

**Método Híbrido de Correspondência para Pares
Estereoscópicos de Imagens Aéreas e de Satélite de
Alta Definição**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Raul Queiroz Feitosa

Co-orientador: Prof. Jorge Luíz Nunes e Silva Brito

Rio de Janeiro

Dezembro de 2008



Yves Denis Heckel

**Método Híbrido de Correspondência para Pares
Estereoscópicos de Imagens Aéreas e de Satélite de
Alta Definição**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Raul Queiroz Feitosa
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Jorge Luíz Nunes e Silva Brito
Co- Orientador
UERJ

Prof. Marcos Azevedo da Silveira
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Sidnei Paciornik
DCMM

Prof. Guilherme Lúcio Abelha Mota
UERJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 16 de dezembro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Yves Denis Heckel

Graduou-se em Engenharia Elétrica na universidade de Paris XI – ENS Cachan (*Ecole Normale Supérieure de Cachan* – França). Kursou Visão computacional na PUC-Rio em 2006-2007, em intercâmbio com a ENS Cachan na França onde obteve também o diploma de “máster” europeu. É agora professor de física fundamental no ensino superior na região parisiense, preparando os alunos aos concursos das grandes escolas de engenheiros.

Ficha Catalográfica

Heckel, Yves Denis

Método híbrido de correspondência para pares estereoscópicos de imagens aéreas e de satélite de alta definição / Yves Denis Heckel ; orientador: Raul Queiroz Feitosa ; co-orientador: Jorge Luis Nunes e Silva Brito. – 2008.

115 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Método híbrido de correspondência. 3. Par estereoscópico. 4. Correlação por mínimos quadrados. 5. Crescimento de região. 6. Imagens aéreas e de satélite. 7. Modelos 3D. 8. SIFT. I. Feitosa, Raul Queiroz. II. Brito, Jorge Luis Nunes e Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus professores Marcos Azevedo da Silveira, Raul Queiroz
Feitosa e Jorge Luis Nunes e Silva Brito, pela ajuda, compreensão,
paciência, e pelo tempo passado

À Luízinha, pelo carinho de todos os momentos

Ao Cristo Redentor por iluminar os meus dias no Rio

Resumo

Yves Denis Heckel; Raul Queiroz Feitosa (Orientador); Jorge Luis Nunes e Brito Silva (Co-orientador). **Método híbrido de correspondência para pares estereoscópicos de imagens aéreas e de satélite de alta definição.** Rio de Janeiro, 2008, 115p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A partir da disponibilização comercial de imagens de alta resolução, modelos 3D de superfícies geradas a partir de imagens aéreas e de satélite tornaram-se uma alternativa mais atraente para aplicações como planejamento de telecomunicações, monitoramento de desastres e planejamento urbano. A exatidão dos modelos 3D da superfície terrestre baseados em pares de imagens estereoscópicas depende da exatidão com que pontos homólogos são localizados em ambas as imagens. Os métodos automáticos de localização de pontos homólogos em imagens digitais baseados em área, combinados com técnicas de crescimento de região, são capazes de produzir uma nuvem densa e exata de pontos homólogos. Entretanto, o processo de crescimento de região pode ser interrompido em regiões da imagem cujo efeito de uma variação abrupta da paralaxe no eixo x aparece de maneira importante. Neste caso, novas sementes devem ser introduzidas, normalmente por um operador humano. A partir dessas novas sementes, o processo será reiniciado. Dependendo do tipo da imagem utilizada e da estrutura 3D da região mapeada, a intervenção humana pode ser considerável. Propõe-se então uma alternativa completamente automatizada no qual se combinam as técnicas do SIFT (Scale Invariant Feature Transform), mínimos quadrados e crescimento de região. Experimentos realizados em pares de imagens aéreas e de satélite cobrindo diversos tipos de terrenos mostraram a eficácia do método proposto, especialmente em regiões com mudanças abruptas de elevação, como fachadas de prédios altos.

Palavras-chave

Método híbrido de correspondência, par estereoscópico, correlação por mínimos quadrados, crescimento de região, SIFT, imagens aéreas e de satélite, modelos 3D.

Abstract

Yves Denis Heckel; Raul Queiroz Feitosa (Advisor); Jorge Luis Nunes e Silva Brito (Co-advisor). **Hybrid Matching Method for stereo pairs of high-definition aerial and satellite images**. Rio de Janeiro, 2008, 115p. MSc. Dissertation, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After the high resolution images became commercially available, 3D surface models generated from space-born stereo images turned into an attractive alternative for applications such as telecommunication planning, disaster monitoring and urban planning. The accuracy of the 3D models of the earth surface depends on the accuracy of corresponding points located in both images. Area-based automatic image matching combined with a region-growing technique are able to provide a dense and accurate grid of corresponding points. However the region-growing process may stop at image patches where the effect of a sudden change in the x-parallax is important. In such a case new seed points must be provided, usually by human operator. From the additional seed points the region-growing procedure may continue. Depending upon the type of image and the 3D-structure of the mapped area, the human intervention may be considerable. A fully automatic alternative that combines the SIFT (Scale Invariant Feature Transform), least square matching and region-growing technique is proposed in this work. Experiments conducted on stereo pairs of Ikonos and aerial images covering different terrain types have shown the effectiveness of the proposed method especially in locations with abrupt height changes, such as façades of high buildings.

Keywords

Hybrid matching method, stereo pair, least-square matching, region growing, SIFT, aerial images, satellite images, 3D models,

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Motivação	12
1.2	Estrutura da dissertação.....	14
2	Trabalhos Relacionados.....	16
2.1	Métodos baseados em área.....	16
2.1.1	Correlação por Mínimos Quadrados	17
2.1.2	Crescimento de Região.....	20
2.1.3	Limitações dos métodos baseados em área	23
2.2	Métodos baseados em feições – SIFT.....	26
2.2.1	Detecção dos pontos chave do SIFT	27
2.2.2	Descritores dos pontos chave	31
2.2.3	Correspondência.....	32
3	O método híbrido.....	33
3.1	Princípio do método proposto	33
3.1.1	Método híbrido em um passo	33
3.1.2	Método híbrido em 2 passos.....	34
3.2	Detalhe do método híbrido em um passo.....	35
3.2.1	Homogeneidade dos deslocamentos dos pontos homólogos	36
3.2.2	Análise da correspondência baseada em feições	40
3.2.3	Análise da correspondência baseada em área.....	41
3.3	Detalhamento do método híbrido em dois passos.....	42
3.3.1	Primeiro passo	42
3.3.2	Extração de informações	42
3.3.3	Segundo passo	45
4	Análise do desempenho	46
4.1	Descrição dos dados.....	46
4.1.1	Imagens de satélite Ikonos	46
4.1.2	Imagens aéreas	48
4.1.3	Seleção de sub-regiões nas imagens.....	50
4.2	Medida do desempenho	50
4.2.1	Cobertura simples.....	50
4.2.2	Cobertura nos topos.....	55
4.2.3	Porcentagem de topos atingidos	56
4.3	O protótipo.....	59
4.3.1	Seqüência das operações	59
4.3.2	Janelas da interface.....	60

4.4	<i>Experimentos</i>	66
4.4.1	Experimento 1 : As coberturas manuais – As referências	66
4.4.2	Experimento 2 : Desempenho do método híbrido em 1 passo	70
4.4.3	Experimento 3 : Desempenho do método híbrido em 2 passos	74
5	Conclusão	86
	Referências	71
	APÊNDICE A: Detalhe do programa DPCOR	90
	APÊNDICE B: Detalhe do protótipo	94
	APÊNDICE C: Coordenadas detalhadas das 12 sub-imagens	113
	APÊNDICE D: Detalhes do primeiro experimento	114

Lista das figuras

<i>Figura 1.1: Esquerda - Imagem Ikonos duma área com prédios de resolução 1m/pixel Direta -</i>	
<i>Reconstituição 3D a partir duma correspondência com correlação por mínimos quadrados.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.1 : Influência duma mudança no ponto de vista 3D sobre o par de imagens.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.2 : Par de imagens originais e 1º exemplo do crescimento de região com cobertura limitada.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.3 : Segundo exemplo do crescimento de região com uma cobertura maior.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.4 : Crescimento de região falhando em topos de prédios altos.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.5 : Efeito de uma mudança do ponto de vista 3D na imagem de um prédio alto</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.6 : Etapas de um método de correspondência baseado em feições.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.7 : Pirâmide de imagens filtradas pelas gaussianas com 3 oitavas e 5 níveis cada.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.8 : Pirâmide de diferenças de gaussianas das imagens (DoG).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.9 : Seleção dos extremos na pirâmide DoG entre os 26 vizinhos.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.10 : O descritor do SIFT</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.1: Comparação do método manual e do método híbrido em um passo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.2: Método híbrido de localização dos pontos homólogos em 2 passos.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.3: Ilustração da homogeneidade de deslocamento entre as correspondências em duas imagens.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.4: Exemplo de correspondência onde a homogeneidade não é respeitada</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.5: Restrição na área de busca com uso da homogeneidade dos deslocamentos a priori.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.6: Restrição da área de busca com uma imagem de 500 × 500 pixels.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.7: Funções realizadas pela correlação por mínimos quadrados e crescimento de região</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.8: Esquerda - cobertura obtida com o crescimento de região – Direta - a máscara dos buracos.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.1 : uma das imagens IKONOS da região do Rio de Janeiro utilizadas na análise</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.2 : Zoom em uma das partes da imagem – resolução de 1m/pixel.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.3 : uma das imagens aéreas da região do Rio de Janeiro utilizada nos experimentos</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.4 : Zoom na imagem aérea da figura 4.3</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.5 : Máscara dos topos aparecendo em branco.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.6 : Exemplo de topo atingido somente por um ponto</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.7 : Acima : imagem original sem cobertura, Abaixo : Os topos são totalmente cobertos, não atingidos ou somente por poucos pontos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.8 : Organização das operações no protótipo</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.9 : Janela Principal da interface gráfica</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.10 : Janela da correspondência de feições.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.11 : Janela de definição da grade de avaliação.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.12 : Janela dos resultados.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.13 : Coberturas simples obtidas com uma semente manual segundo o tipo de região</i>	<i>68</i>

<i>Figura 4.14 : Exemplo de problemas encontrados em áreas residenciais com imagens de satélite.</i>	
<i>Acima : par de imagens originais, abaixo : imagens com a cobertura obtida em branco.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.15 : Porcentagem de topos atingidos e cobertura nos topos com uma semente manual.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.16 : Coberturas simples obtidas com o método híbrido em 1 passo segundo o tipo de região</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.17 : Porcentagem de topos atingidos e cobertura nos topos com uma semente manual.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.18 : Comparação do desempenho em imagens aérea segundo o tipo de região.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.19 : Comparação dos métodos em imagens de satélite segundo o tipo de região.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.20 : Cobertura obtida com uma semente manual numa área residencial (acima: par de imagens originais sem cobertura, abaixo : as imagens com a primeira cobertura obtida).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.21 : Cobertura obtida com o método híbrido na mesma área residencial.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.22 : Cobertura obtida com o método manual em torno de um prédio alto</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.23 : Cobertura obtida com o método híbrido em torno de um prédio alto.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.24 : Comparação do desempenho dos três métodos em imagens de satélite com prédios altos.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.25 : Comparação do desempenho dos três métodos em imagens aéreas com prédios altos.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.26 : Detalhe dos topos atingidos pelos três métodos em todas as imagens com prédios altos.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.1 : Imagem original (acima) e a reconstituição 3D abaixo do nosso mapa de correspondência.</i>	<i>87</i>
<i>Figura B.1 : Grupos de operações do programa</i>	<i>97</i>
<i>Figura B.2 : Detalhe da parte do pre-processamento.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura B.3 : Detalhe da parte da correspondência de feições.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura B.4 : Janela de definição dos parâmetros da correspondência de áreas.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura B.5 : Janela de definição dos parâmetros da correspondência de feições.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura B.6 : Janela de definição e de cálculo dos pre-processamentos</i>	<i>105</i>
<i>Figura B.7 : Janela de definição da grade de avaliação</i>	<i>106</i>
<i>Figura B.8 : Janela da correspondência de feições</i>	<i>108</i>
<i>Figura B.9 : Janela de avaliação de resultados.....</i>	<i>112</i>

Lista das tabelas

<i>Tabela 2.1: Comparação entre Correlação Cruzada Normalizada e Correlação por Mínimos</i>	
<i>Quadrados</i>	17
<i>Tabela 4.1 : As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 1</i>	51
<i>Tabela 4.1 : As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 2</i>	52
<i>Tabela 4.1 : As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 3</i>	53
<i>Tabela 4.1 : As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 4</i>	54
<i>Tabela 4.2 : Resultados da primeira experiência – o método manual com uma semente</i>	67
<i>Tabela 4.3 : Parâmetros utilizados no método híbrido em 1 passo</i>	71
<i>Tabela 4.4 : Resultados da segunda experiência – método híbrido em 1 passo</i>	72
<i>Tabela 4.5 : Parâmetros utilizados no método híbrido em 2 passos para imagens de satélite</i>	74
<i>Tabela 4.6 : Parâmetros utilizados no método híbrido em 2 passos para imagens aéreas</i>	75
<i>Tabela 4.7 : Resultados da terceira experiência – método híbrido em 2 passos</i>	76
<i>Tabela 4.8 : Topos de edifícios atingidos por cada método</i>	85
<i>Tabela C.1 : Coordenadas das 12 sub-imagens selecionadas para os testes</i>	113
<i>Tabela D.1 : Resultados completos da primeira experiência – o método manual</i>	114