

Extração automática de edifícios: Comparação de paradigmas e exemplos

Aluir Porfirio Dal Poz

Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP
R. Roberto Simonsen, 305 - 19060-900 - Presidente Prudente - SP
aluir@fct.unesp.br

Abstract. This paper compares the paradigms of laser scanning and aerophotogrammetry in the context of building extraction and briefly discusses two roof building contour extraction methodologies. The assets and drawbacks of both data capturing system have been reported several times. In general, empirical and theoretical studies have confirmed that laser scanning methodologies are more suitable in deriving building heights and in extracting planar roof faces and ridges of the roof, whereas the aerophotogrammetry are more suitable in extracting building roof outlines. The first roof contour methodology is based on a Digital Elevation Model (DEM), which is generated through the regularization of an available laser point cloud. First, in order to detect aboveground objects, the DEM is segmented through a recursive splitting technique and a Bayesian merging technique. The aboveground object polygons are extracted by using vectorization and polygonization techniques. Finally, the building roof contours are identified among all aboveground objects extracted previously, taking into account roof features and a Markov Random Field (MRF) model. The second methodology addresses the geometric refinement of laser-derived 3D roof contours by using high-resolution aerial images and a MRF model. First, 3D roof contours are projected onto the image-space. Then, the projected contours and the straight lines extracted from the image are used to establish an MRF description. The solution of the associate energy function provides groupings of straight lines representing roof building contours, which are topologically reconstructed based on the topology of the projected contours. Examples of applications are provided for both approaches.

Palavras-chave: Varredura a laser, aerofotogrametria, extração de edifícios, laser scanning, aerophotogrammetry, building extraction.

1. Introdução

O problema de extração de edifícios usando dados fotogramétricos e de varredura a laser vem sendo, desde a década de 1990, alvo de muitas pesquisas. As metodologias existentes podem ser classificadas de acordo com o tipo de dado de entrada (Rutzinger et al., 2006), quais sejam: malha irregular de pontos gerados a partir do processamento dos dados originais do sistema laser; malha regular gerada pela regularização da malha irregular, isto é, um MDE (Modelo Digital de Elevação); e dados híbridos, isto é, a combinação dos dados laser com dados de outros sensores ou com dados georreferenciados.

A principal vantagem de se utilizar os dados irregulares é o fato de se dispensar a aplicação de técnicas de interpolação, evitando-se assim novas fontes de erros. Por outro lado, metodologias especiais necessitam ser desenvolvidas para o tratamento de dados irregularmente distribuídos. Por exemplo, Hofmann et al. (2003) apresentaram uma solução para extração de telhados de edifícios baseados em malha laser irregular. A partir desses dados é gerada uma estrutura TIN (*Triangulated Irregular Network*) e, na seqüência, os parâmetros da equação planar, calculados para cada triângulo da TIN, são usados para gerar um espaço paramétrico. Tendo em vista que os triângulos de um mesmo telhado são representados por pontos bem próximos no espaço dos parâmetros, cada telhado pode ser encontrado através de análise de agrupamento neste espaço.

O uso de MDE tem a vantagem de possibilitar a aplicação de técnicas padrão de análise de imagem. Por exemplo, em Rottensteiner et al. (2006) é apresentada uma

metodologia baseada em três etapas. Na primeira etapa os planos representando telhados são detectados através da análise do vetor normal ao MDE, calculado numericamente em cada nó da malha. Pontos com orientação próxima são considerados como pertencentes a um mesmo telhado. Na segunda etapa as bordas são detectadas analisando onde existe mudança abrupta de altura e onde os planos se interceptam. Finalmente, as arestas (bordas) e planos são combinados para construir modelos poliedrais para cada edifício.

A combinação de dados laser com outros dados, sejam estes de imagem ou georreferenciados, vem sendo explorada com frequência. Seguem alguns exemplos de metodologia existentes. Tendo em vista a maior facilidade de se identificar vegetação em imagens multiespectrais, através por exemplo de técnicas de classificação via índices de artificialidade, Haala e Brenner (1999) combinaram imagens multiespectrais com dados MDE de varredura a laser para separar edifícios e vários tipos de vegetação. Sohn e Dowman (2003) descreveram um método automático para a extração de edifícios a partir da combinação entre imagens multiespectrais do satélite Ikonos e dados MDE provenientes do sistema de varredura a laser. A idéia básica consiste em extrair os edifícios nas duas fontes de dados e, após, compará-los com a finalidade de remover inconsistências. Em Vosselman (2002) é encontrada uma estratégia para a reconstrução 3D de edifícios usando dados laser, dados georreferenciados e imagens aéreas de alta-resolução. As plantas baixas de edifícios são obtidas dos dados georreferenciados, as quais são utilizadas como referência para a extração das superfícies poliedrais representando os edifícios. As bordas dos telhados são refinadas a partir das imagens aéreas.

Neste artigo são inicialmente discutidos (Seção 2) os paradigmas de varredura a laser e de aerofotogrametria no contexto do problema de extração de edifícios. Na sequência são apresentados os princípios de duas metodologias para a extração de contornos de telhados, tendo por base dados de varredura a laser (Seção 3) e a combinação entre dados de varredura a laser e fotogramétricos (Seção 4). O artigo é finalizado na Seção 5 com algumas considerações finais.

2. Varredura a laser *versus* aerofotogrametria

A figura 1 mostra, de uma forma geral, as características mais relevantes dos paradigmas de varredura a laser e de aerofotogrametria. O paradigma de varredura a laser (figura 1(a)) caracteriza-se por usar um feixe de vetores 3D, cada qual com origem num ponto de emissão laser (E) e com ponto terminal (P) sobre a superfície física (SF). O termo superfície física refere-se tanto ao terreno quanto aos objetos sobre ele. O objetivo de sistemas de varredura a laser é a determinação de pontos terminais do feixe de vetores 3D, visto que em quantidade e distribuição adequada permite descrever a superfície física da Terra, bem como objetos sobre ela. Cada vetor 3D é uma representação simplificada de um feixe laser altamente colimado, aproximando-se de um cone com abertura angular bastante pequena. Um dado vetor \vec{EP} fica totalmente determinado através dos seguintes parâmetros geométricos do respectivo feixe laser:

- Ponto origem (E) do feixe laser determinado pelo GPS (*Global Positioning System*);
- Orientação do feixe laser determinada por uma IMU (*Inertial Navigation System*);
- Distância \overline{EP} determinada via sensor ativo laser, consistindo basicamente na determinação do tempo de propagação do feixe laser entre os pontos E e P.

Os parâmetros geométricos do feixe laser permitem determinar as coordenadas 3D do ponto P, entretanto sem nenhuma redundância. Isto significa que erros cometidos nas medidas dos parâmetros geométricos do feixe não podem ser verificados internamente. As coordenadas 3D de pontos sobre a superfície física são determinadas no sistema de coordenadas GPS, implicando na necessidade de determinação de parâmetros de posição e orientação entre os sensores GPS, IMU e laser. Outro ponto importante é a sincronização entre os três sistemas sensores, visto que a orientação e a posição do feixe laser devem ser conhecidas no exato momento de medida da respectiva distância laser.

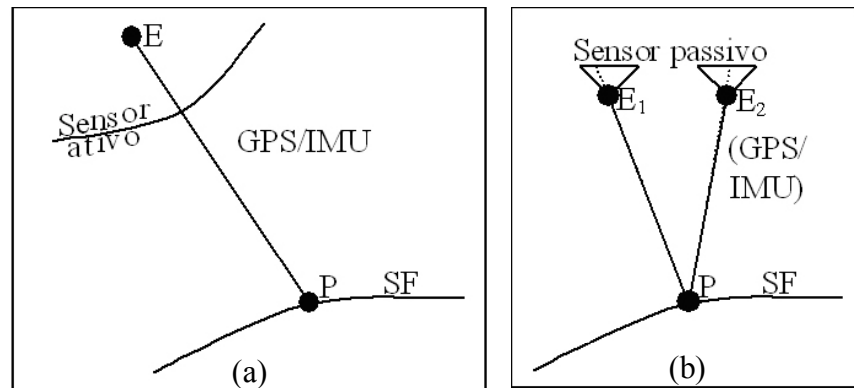


Figura 1. Princípios. (a) Varredura a laser; e (b) Aerofotogrametria.

O paradigma de aerofotogrametria é centenário e, diferente do paradigma de varredura a laser, baseia-se em dois feixes de raios perspectivos que se interceptam na superfície física. Ambos os feixes perspectivos são gerados por um sensor passivo de imageamento em duas estações (E_1 e E_2) de exposição (figura 1(b)). Cada ponto P da superfície física é definido pela intersecção de dois raios homólogos, que passam pelas estações de exposição E_1 e E_2 . A solução deste problema implica na necessidade de determinação da orientação dos dois feixes de raios perspectivos, que pode ser de forma direta usando os sistemas GPS e IMU ou indireta usando pontos de apoio. Portanto, os sistemas GPS e IMU são opcionais na aerofotogrametria, mas são indispensáveis na varredura a laser. Outro aspecto que diferencia ambos os paradigmas é a redundância nas determinações fotogramétricas de pontos sobre a superfície física, o que não é possível com o paradigma de varredura a laser.

O uso de dados de varredura a laser, na forma de um MDE ou de uma estrutura TIN, ou de dados fotogramétricos na extração de edifícios, apresenta vantagens e desvantagens. A tabela 1 apresenta os principais elementos para a análise dos pontos fracos e fortes de cada paradigma no contexto de extração de edifícios. As linhas de descontinuidade geralmente ocorrem ao longo dos contornos de telhados. Como os dados de varredura a laser fornecem baixa qualidade posicional para estas entidades, os dados fotogramétricos devem ser utilizados para se obter contornos de telhados com alta qualidade. A situação se inverte quando se deseja medir pontos em regiões homogêneas, que é geralmente o caso de faces de telhados. O paradigma fotogramétrico baseia-se na determinação de correspondência entre pontos de duas imagens, tarefa difícil de ser realizada em áreas homogêneas, até mesmo por um operador. Como os dados laser são abundantes e de alta qualidade altimétrica em regiões homogêneas, o paradigma de varredura a laser é apropriado para a extração acurada de faces planas de telhado de

edifício. Em decorrência, os dados laser também possibilitam extrair acuradamente as cumeeiras de telhados via intersecção de planos de telhados. Por último, a qualidade da informação semântica nas duas fontes de dados é bem diversa. Embora vários sistemas de varredura a laser possibilitem o registro da intensidade de retorno do pulso laser, que depende basicamente do tipo de material do alvo, seu uso é limitado na extração de edifícios. Efetivamente os dados laser são de caráter posicional, apresentando portanto pouca qualidade semântica. Ao contrário, os dados de imagem possibilitam a atribuição de significado semântico com alto grau de detalhamento.

Tabela 1. Complementaridade dos paradigmas na extração de edifícios.

Elementos de comparação	Paradigmas	
	Varredura a laser	Aerofotogrametria
Linhas de descontinuidade	Baixa qualidade posicional	Alta qualidade posicional
Regiões homogêneas	Densa informação posicional	Pouca informação posicional
Precisão posicional	Melhor em altimetria	Melhor em planimetria
Informação semântica	Baixa	Alta

Kaartinen et al. (2005) avaliaram 11 metodologias para a extração de edifícios, tendo por referência edifícios selecionados em mapas cadastrais. Estas metodologias baseiam-se no paradigma de varredura a laser ou no paradigma fotogramétrica ou na combinação entre ambos, possuindo diferentes graus de refinamento e automação. Os resultados obtidos são teoricamente os esperados, mas trazem outras informações, principalmente qualitativas, que complementam a análise acima. As principais conclusões dos autores foram:

- Qualidade dos contornos dos telhados: como previsto, as metodologias baseadas nos dados fotogramétricos possibilitaram a extração de contornos de telhado com qualidade claramente superior. Os principais fatores que influenciaram a qualidade dos resultados foram: a densidade de pontos, as sombras de árvores e a complexidade das estruturas dos edifícios;
- Qualidade de distâncias medidas entre dois pontos: como esta medida está também ligada à qualidade de definição de pontos, a conclusão é parecida com a obtida no item anterior;
- Qualidade altimétrica: os resultados confirmaram que os dados laser são superiores na determinação de elevações. O uso dos dados laser para modelar superfícies planas de telhado é influenciado principalmente pelos seguintes fatores: a densidade de pontos; a inclinação do telhado e as dimensões do telhado;
- Tempo de captura dos dados: é dependente principalmente da complexidade do edifício e do grau de automação e confiabilidade;
- Qualidade planimétrica *versus* grau de automação das metodologias baseadas no paradigma de varredura a laser: os graus de automação e de acurácia são inversamente relacionados;
- Qualidade altimétrica *versus* grau de automação das metodologias baseadas no paradigma de varredura a laser: praticamente nenhuma correlação foi encontrada, mostrando que a determinação de faces de telhados pode ser feita automaticamente e de forma robusta.

De uma forma geral, estes resultados confirmam que a combinação entre os dados laser e fotogramétricos é útil para melhorar a determinação de pequenos detalhes e de contornos de edifícios.

3. Exemplo de metodologia para a extração de contornos de edifícios usando dados de varredura a laser

Galvanin et al. (2008) desenvolveram uma metodologia para extração automática de contornos de telhado de edifícios utilizando dados de varredura a laser. A metodologia baseia-se em duas etapas principais:

1. Extração de regiões altas (edifícios, árvores etc.) de um MDE gerado a partir de dados de varredura a laser: Nesta etapa são utilizadas a técnica de divisão recursiva via estrutura *quadtree* e uma técnica de fusão Bayesiana de regiões. Inicialmente a técnica de divisão recursiva é usada para particionar o MDE em regiões homogêneas. No entanto, devido a ligeiras diferenças de altura no MDE, nesta etapa a fragmentação das regiões pode ser relativamente alta. Para minimizar essa fragmentação, uma técnica de fusão Bayesiana de regiões é aplicada nos dados segmentados. Utiliza-se para tanto um modelo hierárquico, cujas alturas médias das regiões dependem de uma média geral e de um efeito aleatório, que incorpora a relação de vizinhança entre elas. A distribuição a priori para o efeito aleatório é especificada como um modelo condicional auto-regressivo (CAR). As distribuições a posteriori para os parâmetros de interesse foram obtidas utilizando o Amostrador de Gibbs.
2. Extração das regiões altas que correspondem a contornos de telhados: esta etapa da metodologia consiste na separação dos telhados entre os objetos altos extraídos na primeira etapa da metodologia. As regiões altas são agora estruturadas segundo um RAG (*Region Adjacency Graph*), onde cada nó do RAG corresponde a uma região alta. Nesta etapa é utilizada uma abordagem baseada em MRF (*Markov Random Field*). Essa modelagem deve propiciar a obtenção apenas dos contornos correspondentes aos telhados. A análise de cada região, dadas as medidas de alguns atributos (por exemplo, área, retangularidade, ângulos entre eixos principais de objetos) realizadas nas regiões do MDE, por hipótese obedece a um MRF. Assim, a construção do MRF envolve a definição de uma função de energia apropriada e o problema de análise é resolvido a partir da estimativa MAP (*Maximum a posteriori*), via algoritmo *Simulated Annealing* (SA). A configuração de objetos que atendem a este critério deve corresponder, com certa probabilidade, aos contornos de telhados existentes na área de estudo.

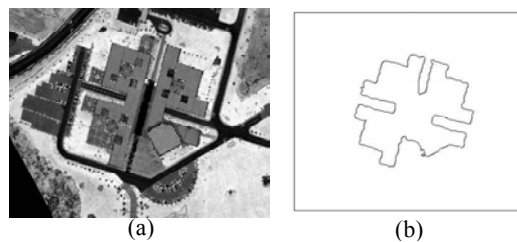


Figura 2. Exemplo de resultado de extração de edifícios a partir de dados de varredura a laser. (a) Imagem de intensidade; e (b) Resultado.

A figura 2 mostra um resultado envolvendo um edifício de relativa complexidade. A figura 2(a) é uma imagem de intensidade, cuja função é apenas a de permitir a visualização da área teste. A metodologia trabalha diretamente com um MDE. Como mostra a figura 2(b), o contorno extraído é de boa qualidade. Notar que nenhum algoritmo de regularização foi aplicado ao contorno extraído.

4. Exemplo de metodologia para a extração de contornos de edifícios combinando dados de varredura a laser e de imagem

Dal Poz (2008) desenvolveu uma metodologia para o refinamento geométrico de contornos de telhados extraídos de dados de varredura a laser, usando imagens aéreas de alta resolução e modelos MRF. Como mostra a figura 3, a metodologia proposta compreende o registro de contornos de telhados na imagem, a extração de feições retas vizinhas dos contornos de telhados projetados, o estabelecimento da função de energia ($U(x)$) tendo por base o modelo MRF, a otimização da função de energia para gerar agrupamentos de feições retas representando segmentos isolados de telhados no espaço imagem e a complementação dos agrupamentos de feições retas detectadas para reconstruir os contornos refinados de telhados no espaço imagem. Estes procedimentos formam o corpo principal da metodologia proposta.

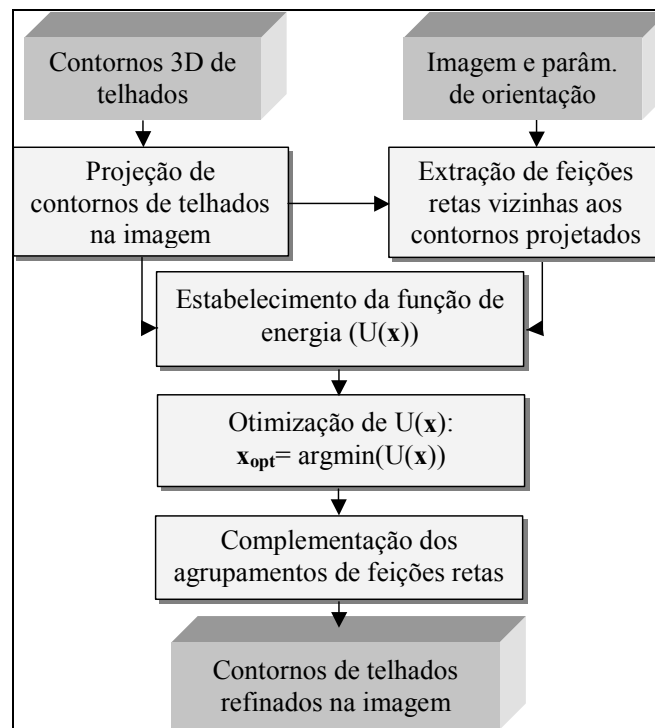


Figura 3. Metodologia para refinamento de contornos de telhados.

Os contornos de telhados 3D extraídos de dados de varredura a laser, a imagem aérea e os respectivos parâmetros de orientação são assumidos como disponíveis. Os parâmetros de orientação da imagem são utilizados para transformar, via equações de colinearidade, os contornos 3D de telhados no sistema de coordenadas de imagem (LC).

As feições retas são extraídas apenas na vizinhança dos contornos de telhados projetados na imagem. Inicialmente são aplicados seqüencialmente o algoritmo de

detecção de bordas de Canny, um algoritmo perseguidor de bordas na imagem de bordas e o algoritmo de poligonização por divisão recursiva (Jain et al., 1995). As feições retas extraídas dessa forma geralmente estão conectadas ao longo de polígonos ou linhas poligonais. Na seqüência, as feições retas menores (de 2 a 3 pixels) e as que diferem muito em orientação (por exemplo, acima de 20°), em relação aos contornos projetados, são removidas, visto que são candidatas improváveis a constituir agrupamentos de telhados. Finalmente, regras simples de agrupamento perceptual (isto é, proximidade e colinearidade) são usadas para fundir retas colineares e possibilitar uma redução maior do número de candidatas a representar agrupamentos de contornos de telhados.

As feições retas extraídas na vizinhança do contorno de telhado projetado são usadas para construir um modelo MRF expressando formas de telhados de edifícios, tendo por referência os contornos projetados de telhados. A função de energia associada ($U(\mathbf{x})$) é otimizada através de um método modificado de enumeração exaustiva. Duas heurísticas são exploradas para evitar a explosão combinatorial para os casos de maior dimensionalidade. A primeira consiste em impor a existência de apenas uma correspondência válida para cada lado do telhado projetado. A outra heurística restringe o processo de otimização para configurações com um certo número mínimo de feições retas. O objetivo do processo de otimização é obter o vetor randômico (\mathbf{x}_{opt}) que minimiza a função de energia, isto é: $\mathbf{x}_{opt} = \text{argmin}(U(\mathbf{x}))$. O vetor solução \mathbf{x}_{opt} codifica binariamente as feições retas representantes, ou não, de lados de contornos de telhados. É atribuído o valor unitário (1) para as feições retas que representam lados de contornos de telhados. Caso contrário, é atribuído o valor nulo (0).

O método de otimização gera agrupamentos de feições retas isoladas, cujas correspondências com os lados dos contornos projetados são conhecidas. Nos lados do contorno projetado de telhado em que a metodologia falha em encontrar feições retas correspondentes, a metodologia de complementação aproveita as respectivas feições retas projetadas. O problema consiste basicamente em encontrar os novos vértices do polígono que representa o contorno de telhado, tratando-se de um problema simples de intersecção de pares de retas, de acordo com a topologia do contorno projetado de telhado.

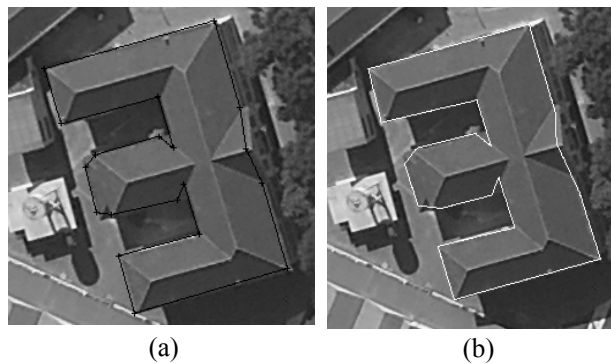


Figura 4. Exemplo de resultado. (a) Contorno extraído de dados de varredura a laser e projetado na imagem; e (b) Contorno de telhado refinado com dados da imagem.

A figura 4 mostra um exemplo de aplicação. Na figura 4(b) é apresentado o resultado do refinamento do contorno de telhado previamente extraído de dados de varredura a laser (figura 4(a)). Os parâmetros de completude e correção são utilizados para caracterizar a qualidade dos resultados obtidos. Como o polígono refinado está completo,

o valor do parâmetro de completeza é de 100%. Na verdade, este parâmetro não é significativo porque a metodologia sempre complementa o contorno com feições retas projetadas nos locais em que a metodologia não encontrou feições retas correspondentes. O contorno refinado está geometricamente correto em aproximadamente 79% dos lados (correção de 79%). Portanto, uma boa melhoria na geometria do contorno foi obtida.

5. Considerações Finais

Este artigo apresentou uma visão geral sobre os paradigmas de varredura a laser e de aerofotogrametria, com foco no problema de extração automática de edifícios. Foram analisados teoricamente os pontos fracos e fortes de cada paradigma, bem como a complementaridade entre ambas. As principais conclusões de uma avaliação experimental conduzida por Kaartinen et al. (2005), com base em mais de uma dezena de diferentes metodologias, foram discutidas, mostrando-se coerentes com as expectativas teóricas de ambos os paradigmas. Na segunda parte do artigo foram brevemente apresentados dois exemplos de metodologias para a extração de contornos de telhados. A primeira metodologia baseia-se em dados laser e outra metodologia na combinação de dados laser e fotogramétricos. Um exemplo de aplicação para cada metodologia foi apresentado com intuito de ilustrar o potencial de cada uma.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP, CNPq e CAPES, tanto na forma de bolsa de estudo quanto na forma de auxílio à pesquisa.

Referências

Dal Poz, A. P. **Integração de dados laser e de imagem para a extração de contornos de telhados usando uma abordagem bayesiana**. Calgary – Canadá: Relatório CNPq de pós-doutorado, Depto. de Engenharia Geomática da Universidade de Calgary, 2008, 100p.

Galvanin, E. A. S.; Dal Poz, A. P.; Souza, A. D. Extração automática de contornos de telhados de edifícios usando dados de varredura a laser e campos aleatórios de Markov. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 2, p. 221-241, 2008.

Haala, N.; Brenner, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry e Remote Sensing**, v.54, p.130-137, 1999.

Jain, R.; Kasturi, R.; Schunck, B. G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, 1995.

Hofmann, A. D.; Maas, H. G.; Streilein, A. Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laserscanner point clouds. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Munique, v. 34, CDROM, 2004.

Kaartinen et al. Accuracy of 3D city models: EUROSUR comparison. In: ISPRS Workshop "Laser scanning 2005", **Proceedings** ... Enschede, CDROM, 2005.

Rutzinger, M.; Höfle, B.; Geist, T.; Stötter, J. Object-based building detection based on airborne laser scanning with GRASS GIS environment. In: UDMS 2006, **Proceedings** ... Aalborg, CDROM, 2006.

Sohn, G.; Dowman, I. J. Building extraction using Lidar DEMs and Ikonos images. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Dresden, v. 34, CDROM, 2003.

Vosselman, G. Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, **Proceedings...** Toronto, CDROM, 2002.