

Sistema de Varredura a Laser: Características, Processamento e Métodos de Interpolação de dados

Edinéia Aparecida dos Santos Galvanin

Depto de Matemática, UNEMAT,
78390-000, Barra do Bugres, MT
E-mail: galvanin@gmail.com

Aluir Porfírio Dal Poz

UNESP - Departamento de Cartografia
Faculdade de Ciências e Tecnologia
19060-900, Presidente Prudente, SP
E-mail: aluir@fct.unesp.br.

Resumo: *A tecnologia de varredura a Laser se tornou comum nos últimos anos, pois este sistema permite a aquisição rápida e eficaz de Modelos Digitais de Elevação, com alta precisão e exatidão altimétrica. Os dados da varredura a laser consistem de uma perfilagem irregular onde não se tem o exato espaçamento de pontos no perfil ou entre perfis. Neste trabalho foram implementados alguns métodos de interpolação para gerar uma malha de pontos regular, com valores interpolados nas novas posições criadas na malha. A análise visual dos resultados mostrou vantagens com relação ao interpolador do vizinho mais próximo que possibilitou a obtenção de uma maior nitidez do objeto, no entanto um maior serrilhamento das bordas.*

1 Introdução

Com o avanço da tecnologia, as metodologias para a realização do levantamento tridimensional de pontos no terreno estão se aperfeiçoando. Aliadas ao desenvolvimento tecnológico, surgem as técnicas para a representação direta da superfície terrestre por meio da representação digital do relevo, bem como das elevações associadas com objetos (árvores, edificações etc.) sobre a superfície terrestre. Uma opção que tem se viabilizado atualmente se baseia na coleta de dados através de sistemas de varredura a laser.

Nos últimos anos, o uso da tecnologia de varredura a laser tem se tornado foco de

pesquisas. A necessidade de aquisição rápida e eficaz de dados digitais de elevação do terreno (MDE) tem motivado o uso desta tecnologia. A geração automática de MDE é ainda um problema quando se trata da modelagem dos objetos sobre a superfície do terreno. Efeitos de perspectiva causados pela geometria das fotografias, estabelecimento da correspondência, problema de sombras, entre outros, não permitem a modelagem correta dos objetos. Com o intuito de sanar esses problemas, a varredura a laser surge como uma tecnologia emergente aumentando, nos últimos anos, o interesse da comunidade cartográfica em relação ao conhecimento e ao uso mais intenso desse sistema.

Assim, esse artigo apresenta algumas características do sistema de varredura a laser, princípio de funcionamento do sistema, posição e orientação do sistema, o processamento dos dados obtidos por varredura a laser bem como a implementação de alguns métodos de interpolação.

2 Sistemas de varredura a laser

Existem dois tipos de sistemas de varredura a laser, os sistemas estáticos e os dinâmicos. Nos sistemas estáticos existem basicamente dois princípios diferentes de medida a laser: o princípio que se baseia no intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso até o instante do retorno do mesmo (distância)

ao sistema e o princípio baseado na triangulação [2].

Já o sistema dinâmico, no qual está baseado o sistema de varredura a laser aerotransportado, utiliza um feixe óptico de alta potência e bem direcionado, com coerência no espaço e no tempo, para garantir a qualidade da medição da distância. Para determinar a posição dos pontos no terreno, o sensor conta com apoio de um sistema de posicionamento global com precisão compatível. A posição do sensor na hora da medição de cada ponto é determinada mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS) obtendo-se as posições $X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS}$. Um segundo sistema de apoio, uma IMU, é encarregada de calcular a inclinação (ω, φ, κ) do sensor em torno dos eixos [4].

O sistema de varredura a laser composto pelo GPS, a IMU e o laser Figura 1, tem como função principal, através da emissão e recepção de pulsos de laser, medir a distância entre o sensor e a superfície do objeto. Com a integração GPS/IMU, o sistema fornece uma nuvem de pontos adquirida através das medidas de distância.

O princípio básico do sistema de varredura a laser consiste na utilização de um feixe de laser que é emitido, com o auxílio de um espelho de varredura, em direção aos objetos. Este feixe é refletido ao atingir a superfície dos objetos, retornando um eco ao sistema. Este sistema é então encarregado de registrar o tempo decorrido entre a emissão e a captação do eco, permitindo a obtenção da distância entre o sensor e o objeto iluminado.

Um sistema de varredura a laser é composto de alguns componentes essenciais como o gerador de pulsos laser, conjunto óptico de transmissão e recepção do pulso, detector de sinais, unidade de controle e armazenamento e outros componentes eletrônicos.

O gerador de pulsos, mostrado na Figura 2, é o componente principal do sensor laser. É responsável pelo estímulo do cristal, realizado através de um diodo semiconductor que provê a energia necessária para a emissão de um raio laser de alta energia. Um tipo de cristal comumente utilizado é o chamado Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet (Nd: YAG) [11].

Após o pulso ser gerado, ele é dirigido para a chamada cavidade óptica até um espelho móvel

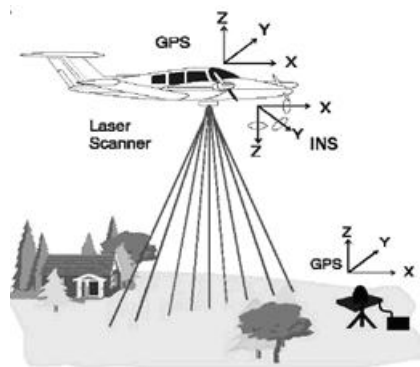


Figura 1: Aeronave e principais componentes do sistema de varredura a laser. (Fonte: [7])

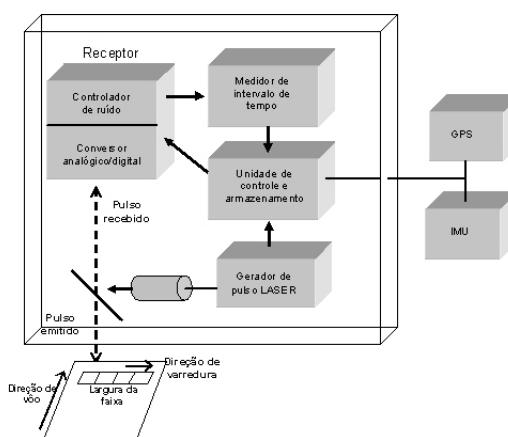


Figura 2: Sistema de varredura a laser. (Fonte: Adaptado de [4])

na parte final do sensor. O conjunto óptico de lentes e espelhos orienta os pulsos laser emitindo-os para os objetos. O sinal de retorno é dirigido à parte eletrônica de recepção do sensor, que recebe um sinal analógico de retorno e por meio de um conversor A/D transforma o sinal analógico em digital. O sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de interferência (controlador de ruído) que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade do sinal emitido.

O Medidor de Intervalo de Tempo (Time Interval Meter - TIM) é o módulo responsável pela medida do tempo transcorrido entre a emissão do pulso laser e o seu retorno ao sistema. Essencialmente, ele é um contador que inicia quando o pulso laser é disparado e para quando o último pulso correspondente retorna.

3 Características do sistema de varredura a laser

A divergência do pulso é uma característica física do pulso laser de divergir à medida que se propaga no meio. Essa divergência é relativamente baixa, resultando numa área do alvo de diâmetro muito pequeno. Um pulso emitido pelo sistema gera no alvo uma área circular de diâmetro (A), relacionada com a altura de vôo (H) e a divergência angular do pulso (γ) (Figura 3).

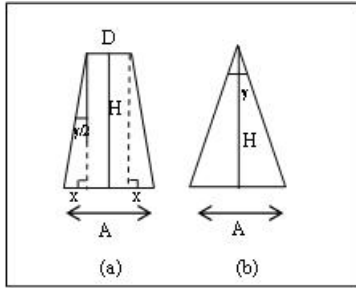


Figura 3: Diâmetro do pulso. (a) considerando uma abertura D ; (b) considerando uma abertura D muito pequena (Fonte: Adaptado de [1])

O diâmetro do círculo projetado no alvo, para uma abertura (D) ilustrada na Figura 3(a), pode ser determinado através da relação de semelhança de triângulos,

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{x}{H} \Rightarrow x = H \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (1)$$

Para uma abertura (D) muito pequena Figura 3(b), a Equação 1 é dada por,

$$A = 2x \Rightarrow A = 2H \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (2)$$

onde: A é o diâmetro do círculo projetado no alvo; D a abertura do laser; γ é a divergência angular do pulso laser em radianos; H é a altura de vôo em metros. No caso de terrenos inclinados, a Equação 2 é generalizada levando em consideração a Figura 4.

$$A = \left(\frac{A_2 H \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\theta - \frac{\gamma}{2}} \right) \quad (3)$$

$$a = \left[\cos(\theta + i) \sin(\theta + i) \tan\left(\left(\theta + i\right) + \frac{\gamma}{2}\right) \right].$$

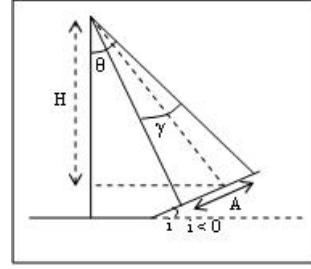


Figura 4: Diâmetro do pulso para terrenos inclinados (Fonte: [1]).

onde: θ é o ângulo de varredura do sistema; i é o ângulo de inclinação do terreno. Dependendo da situação, o ângulo de divergência pode ser ajustado através de elementos ópticos apropriados. Em alguns casos há a necessidade de uma divergência menor como, por exemplo, em levantamentos de detecção de cabos de linhas de transmissão e para maior penetração na vegetação.

A varredura é feita no sentido transversal à direção de vôo com uma abertura especificada pelo operador. O ângulo de varredura permite a determinação da largura de faixa abrangida pela varredura a laser, enquanto o movimento da aeronave permite a cobertura na direção de vôo. As pulsações ópticas refletidas no solo são coletadas pelo receptor e são convertidas de sinal óptico para digital. A largura da faixa abrangida pela varredura, Figura 5, pode ser determinada utilizando a Equação 4,

$$L_f = 2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (4)$$

onde: L_f representa a largura da faixa varrida pelo sensor em metros; H representa a altura de vôo em metros; θ é o ângulo de varredura do sistema.

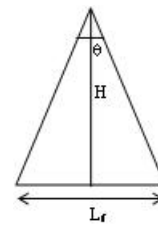


Figura 5: Largura da faixa (Fonte: Adaptado de [1]).

O sistema de varredura a laser utiliza espe-

lhos de varredura óptico-mecânico, sendo que a varredura pode ser unidirecional ou bidirecional, existindo diferentes opções para se efetuar o redirecionamento do feixe do laser [11]. Os espelhos de varredura existentes são classificados em: espelho de varredura Palmer (produz modelos elípticos), polígono de rotação (produz linhas paralelas) e o espelho oscilador (produz linhas em "zig-zag") como mostra a Figura 6.

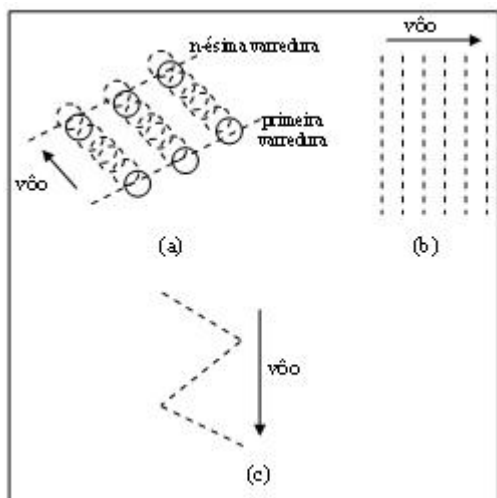


Figura 6: Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho. (a) espelho de varredura Palmer; (b) polígono de rotação; (c) espelho oscilador. (Fonte: Adaptado de [4]).

A Figura 6 mostra a configuração da varredura para três tipos de espelhos. O espelho de varredura Palmer é ilustrado na Figura 6(a), o espelho polígono de rotação (Figura 6(b)) possui varredura unidirecional, e o espelho oscilante possui uma varredura bidirecional (Figura 6(c)). Os pontos ao longo de uma linha são varridos em incrementos de ângulos iguais [11]

O deslocamento da aeronave combinado com movimentos laterais do conjunto óptico móvel produz uma seqüência de varredura que, dependendo do tipo de espelho utilizado, forma um padrão de varredura. O padrão de varredura é definido pela oscilação do conjunto óptico em torno do eixo (frequência de varredura) em conjunto com o movimento da aeronave. Desta forma, a frequência de varredura determina a densidade dos perfis, ou seja, se a frequência de varredura é alta, são obtidos perfis transversais à linha

de vôo, densos. Neste caso, o diâmetro do pulso projetado é superior ao espaçamento em questão, mostrando a necessidade de aumentar a frequência de varredura para uma melhor distribuição dos pontos por metro quadrado.

Para medir a distância entre o sensor e o alvo é necessário determinar as condições atmosféricas e a velocidade de propagação do pulso laser e o tempo transcorrido entre o pulso transmitido e recebido. Esse tempo é detectado pela óptica do sistema e registrado pelo TIM. Dessa forma, a distância pode ser calculada pela Equação 5,

$$R = \frac{1}{2}ct_l, \quad (5)$$

onde: R é a distância entre o sensor e o alvo; c a velocidade da luz; t_l é o tempo transcorrido entre o pulso emitido e recebido.

Os sistemas de varredura a laser operam em qualquer horário, diurno ou noturno. No entanto, existem algumas interrupções como as provocadas por chuva ou nuvens muito densas entre o local varrido e a aeronave. Esses sistemas dependem basicamente da detecção da resposta de uma superfície natural ou artificial. Assim, esta reflexão depende basicamente das características desta superfície.

Uma faixa estreita do espectro é utilizada, operando na faixa do infravermelho próximo e médio, ou seja, entre 800 e 1600 ηm . A faixa do espectro a ser utilizada é limitada por questões de segurança. A escolha da melhor faixa do espectro a ser trabalhada depende das propriedades de reflexão dos alvos, tendo em vista os objetivos do estudo.

4 Posição e orientação do sistema

Em um sistema de varredura a laser, o receptor GPS integrado ao sistema, registra a posição da aeronave em intervalos fixos. Outro receptor localizado no solo fornece a correção diferencial em tempo real para uma determinação de posição mais precisa. O DGPS é um método de refinamento dos dados posicionais derivados do rastreamento realizado pelo GPS por meio da correção de erros inerentes ao processo. O segundo sistema de apoio, isto é, uma IMU, fornece os ângulos de atitude da aeronave durante o levantamento.

A configuração dos sistemas na aeronave é feita posicionando a antena GPS aerotransportada na carenagem externa da aeronave. O sensor laser e a IMU são instalados no interior da aeronave. A integração GPS/IMU é uma ferramenta poderosa. A IMU pode complementar o GPS fornecendo a posição inicial e a informação de velocidade angular após a perda de sinal do receptor. Mesmo quando a visibilidade dos satélites é insuficiente, a IMU pode fornecer informações contínuas de trajetória [3].

5 Imagem de intensidade

Alguns sistemas de perfilamento a laser possuem uma característica marcante que está relacionada com a capacidade de refletância de determinados objetos. Neste caso são disponibilizados dados de intensidade de retorno dos pulsos ao sistema, que variam de acordo com a superfície perfilada, isto é, a superfície pode absorver ou refletir pulsos de forma diferente.

A superfície do material perfilado determina a porcentagem de pulsos que retorna ao sensor. A reflexão do pulso depende basicamente das propriedades da superfície perfilada. A detecção de luz refletida em uma superfície é feita por um componente receptor chamado fotodiodo ou Avalanche PhotoDiodes (APD) e sua sensibilidade é de grande importância para a captação do sinal refletido.

A porcentagem de reflexão dos materiais presentes na superfície tem influência sobre a quantidade de pulsos que retornam ao sistema. Neste caso, a reflexão dos materiais depende basicamente da sensibilidade a determinados comprimentos de onda e das características desta superfície.

A imagem mostrada na Figura 7 é um exemplo de uma imagem de intensidade obtida usando a informação de retorno do primeiro pulso do sistema de varredura a laser.

É possível verificar na Figura 7 que as ruas são facilmente identificadas, fato que é justificado pela baixa capacidade de reflexão do asfalto.

6 Processamento de dados

O sistema de varredura a laser gera um conjunto de dados brutos que devem ser proces-

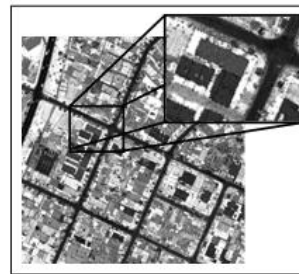


Figura 7: Imagem de intensidade obtida a partir da informação do retorno do primeiro pulso laser (Fonte: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)).

sados para produzir ou modelar da superfície do terreno tridimensionalmente. Esses dados são fornecidos após a realização do voo. Sendo eles: a posição planimétrica, dos pontos no terreno, que é obtida com apoio de um sistema de posicionamento (GPS), a orientação, ou seja a unidade de medição encarregada de calcular a inclinação do sensor (IMU), os intervalos de tempo (medidas de distância do laser) e os ângulos de varredura.

Os pontos do terreno no referencial World Geodetic System 84 (WGS84) podem ser calculados com o auxílio de três conjuntos de dados: dados de calibração do sistema, medidas de distância do laser com seus respectivos ângulos de varredura e dados do GPS e IMU. A Figura 8 ilustra um fluxograma contendo os passos do processamento dos dados provenientes das medidas laser [6].

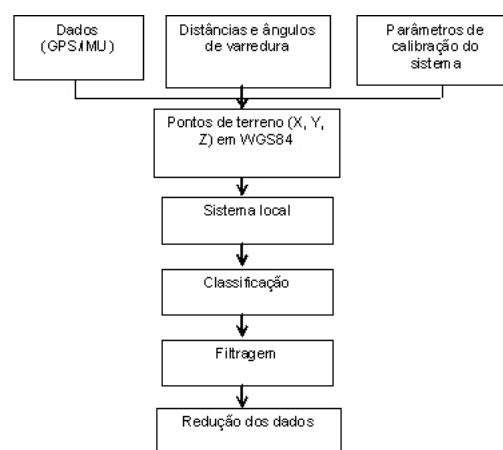


Figura 8: Fluxograma do processamento dos dados provenientes das medidas de varredura a laser (Fonte: Adaptado de [11]).

De acordo com a Figura 8, a partir da aquisição dos dados, o primeiro passo é transformar os pontos para o sistema WGS84 e, na seqüência, transformar os dados da varredura a laser em WGS84 para um sistema de coordenadas local. O resultado é uma nuvem de pontos irregularmente distribuídos em posição e elevação. Salienta-se que a distribuição dos pontos depende do tipo de espelho de varredura utilizado pelo sistema.

Na etapa de classificação, pode-se citar uma metodologia apresentada por [9] onde se utiliza duas estratégias conjuntas para classificação e filtragem de dados de varredura a laser, para geração do MDT. Essa estratégia é dividida em dois estágios. No primeiro estágio, os dados "brutos" são interpolados em uma grade regular. Logo após é realizada a segmentação baseada em diferenças de altura e os dados são classificados em três classes (terreno, edifício e vegetação). No segundo estágio retorna-se para os dados "brutos" e realiza-se a filtragem dos pontos em cada célula da grade de acordo com a classificação prévia.

A redução dos dados é necessária após a etapa de filtragem e interpolação, pois a quantidade de dados envolvidos é muito grande, tornando seu processamento muito lento. O tempo de processamento para calcular um MDT, a partir de dados de varredura a laser, é geralmente três vezes maior que o tempo gasto na de aquisição dos dados [11].

7 Amostragem dos dados

Os dados da varredura a laser consistem de uma perfilagem irregular onde não se tem o exato espaçamento de pontos no perfil ou entre perfis, conforme mostra a Figura 9.

8 Métodos de interpolação

A modelagem de uma superfície não consiste somente na construção de um modelo digital poliédrico. O sistema deverá possuir algoritmos de interpolação de valores de "alturas", em posições não correspondentes aos pontos amostrados. Os algoritmos devem conter certas condições de contorno, baseadas no princípio de que o comportamento de uma superfície contínua possa ser obtida do comportamento

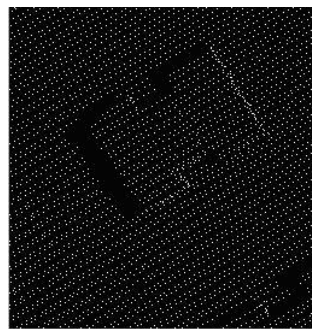


Figura 9: Exemplo de perfilagem irregular obtida por varredura a laser.

conhecido de posições próximas [10]. Os processos de interpolação empregados são, geralmente, os locais, quando se considera uma vizinhança limitada, ou globais, quando a vizinhança sendo considerada é ilimitada.

A escolha da função de interpolação é decisiva para se obter uma boa precisão do modelo. Os requisitos desejáveis para uma função interpoladora são que esta reproduza uma superfície contínua, o tempo computacional não seja proibitivo e tenha propriedades matemáticas de interesse para a aplicação.

[8] discutem os problemas inerentes às técnicas de interpolação que geralmente fazem a predição de pontos através da análise de vizinhança e ajustam esses pontos ao modelo. A função de interpolação, segundo os autores, não deverá ser contínua devido à existência de descontinuidades na superfície. Erros estão sempre presentes nos dados. No entanto, deveriam usar mais dados do que o modelo requer e tentar filtrar os erros grosseiros.

Na literatura relacionada existe uma variedade de métodos de interpolação que podem ser utilizados para a densificação do MDT. Entre eles se destacam as splines, elementos finitos, mínimos quadrados, krigagem e vizinho mais próximo [5]. Dentre esses, o mais comum é a interpolação pelo vizinho mais próximo. Este método é relativamente simples, exigindo menor tempo computacional. No entanto, quando se utiliza o método de interpolação do vizinho mais próximo em edificações que apresentam telhados com duas águas, o resultado final apresenta um efeito de serrilhamento nas bordas.

A Figura 10 mostra os resultados obtidos usando vários métodos de interpolação. A

Figura 10(f) mostra que o interpolador do vizinho mais próximo possibilitou a obtenção de uma maior nitidez das bordas do objeto, mas também um maior serrilhamento das bordas. Além disso, os valores dos atributos Z (alturas) não são alterados, ocorrendo o mesmo com as incertezas destas alturas. O bom contraste dos dados originais e a manutenção dos valores observados são desejáveis para metodologia de reconhecimento de padrão.

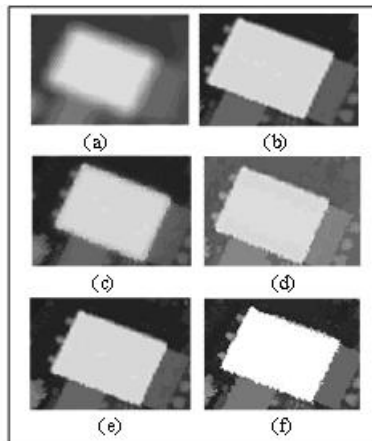


Figura 10: Imagem altimétrica das grades geradas pelos métodos de interpolação. (a) Polinomial local; (b) Krigagem; (c) Inverso da distância; (d) Curvatura mínima; (e) vizinho natural e (f) vizinho mais próximo (Imagens geradas pelo Software Surfer 8).

9 Conclusão

Foram apresentados neste trabalho os principais conceitos relacionados ao sistema de varredura a laser, bem como algumas características importantes do sistema e um teste realizado com diferentes métodos de interpolação. Para cada método, foi analisada a aplicabilidade, o algoritmo, a eficiência e as vantagens dos métodos. No entanto, verificou-se que não existe o melhor método, mas a melhor escolha diante de determinadas circunstâncias. Logo, para a escolha correta do método de interpolação é necessário conhecer as características de cada método bem como os dados que serão utilizados. Futuramente, pretende-se estudar outros métodos de interpolação que evitem o problema de serrilhamento das bordas dos objetos.

Referências

- [1] E. P. Baltsavias, Airborne Laser Scanning: basic relation and formulas, In "ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing", pp. 199-214, Zurich, 1999.
- [2] W. Boehler, G. Heinzg, A. Marbs, The potential of non-contact close range Laser Scanner for cultural heritage recording, In "CIPA International Symposium", University of Potsdam, 2001.
- [3] M. Cramer, D. Stallmann, On the use of GPS/INS exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. In OEEPE Workshop on "Integrated Sensor Orientation", pp. 32-44, Hannover, Germany, 2001.
- [4] Q. Dalmolin, D. R. Santos, "Sistema laser-Scanning: Conceitos e princípios de funcionamento", UFPR, Curitiba, 2004.
- [5] N. El-Sheimy, "Digital terrain modeling", Calgary, 1999.
- [6] C. H. Hug, A. Wehr. Detecting and identifying topographic objects in imaging laser altimeter data, In: "IAPRS", pp. 19-26, 1997.
- [7] LIDAR - Light Detection and Ranging. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/tecnologia.htm> . acessado em 2 de Abril de 2008.
- [8] M. Morgan, A.Habib, Interpolation of Lidar Data for Automatic Building Extraction. In: "ASPRS/ACSM Conference", Washington, D.C., 2002.
- [9] C. Nardinocchi, G. Forlani, P. Zingaretti, Classification and filtering of laser data. In: "ISPRS Working Group III/3 Workshop". Dresden, Germany, 2003.
- [10] F. Pettinati, "Modelamento Digital e Representação Gráfica de Superfícies", Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - U.S.P, São Paulo, 1983.
- [11] A. Wehr, U. Lohr, Airborne laserscanning-an introduction and overview. In: "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", pp. 68-82, 1999.