



Sensoriamento Remoto II - GA115

BLOCO 6 LIDAR

Prof. Dr.Ing. Jorge A.S. Centeno

Departamento de Geomática

UFPR - 2020



L i D A R



1. Princípios:
2. Medição por triangulação
3. Princípio do tempo de propagação
4. Princípio de medição por onda contínua
5. Medição por pulsos
6. Sistema de varredura
7. Laser scanner terrestre
8. Laser scanner aerotransportado ALS
9. First/last pulse
10. Sistemas Multi-pulso
11. Extração de MDT: Introdução
12. Mínimo do bloco
13. Adensamento progressivo



Introdução

A varredura a Laser de uma superfície recebe diversas denominações, dentre as que se pode citar: **LIDAR (Light Detection And Ranging)**: Detecção e medição de distância usando luz **LADAR (Laser Detection And Ranging)**: Detecção e medição de distância usando laser

Laser scanner: varredura a laser.

Esta é uma nova tecnologia projetada para a medição de coordenadas tridimensionais de pontos em uma superfície baseada na emissão de um pulso LASER e a medição da parcela refletida deste pulso pela superfície.

O termo **LASER** - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance) se refere ao uso de um feixe de radiação eletromagnética altamente coerente no espaço e no tempo. Um emissor laser produz um feixe de radiação eletromagnética no qual todas as ondas têm comprimentos de onda muito semelhantes, diferentemente da luz solar, onde vários comprimentos de onda são emitidos ao mesmo tempo. O mais importante, no caso do laser, as ondas emitidas se propagam em fase, ou seja, seus picos ocorrem no mesmo tempo. É por isso que os raios laser são muito estreitos, brilhantes e podem ser focados em um local muito

pequeno. Por isso, laser é usado em diferentes campos, desde leitores de discos, ferramentas de corte ou diferentes aparelhos de medição.

Mas, como um feixe laser pode conter alta energia, seu uso é regido por normas como *IEC 60825-1:1993 Safety of laser products*

Classe	Riscos	Laser	Pot. máx. Emitida
1	Sem perigo	VIS e NIR	~mW
2	Não apresenta perigo se exposta ao olho/córnea durante um curto período de tempo (0,25s)	VIS	1mW
3A	torna-se perigosa para a vista quando o feixe do laser é reduzido através de instrumentos ópticos (por exemplo, a lente).	VIS e NIR	5mW
3B	é perigosa para o olho/córnea e em alguns casos também para a pele.	VIS e NIR	0,5W
4	é extremamente perigosa para a vista e igualmente para a pele. A radiação difusa pode igualmente ser perigosa.	VIS e NIR	0,5W



LiDAR - Laser scanner

Um laser pode ser usado de duas formas para medir distâncias:

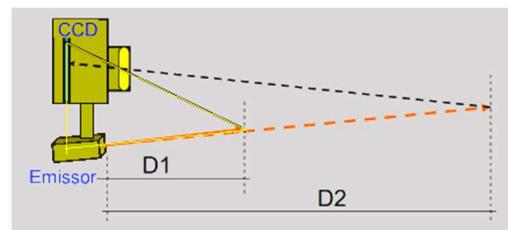
- Usando o princípio de triangulação;
- Medindo o tempo de propagação (time of flight).

Medição por triangulação Estes sistemas utilizam um conjunto fixo contendo um emissor laser e uma câmara, como é mostrado na figura ao lado. O laser é emitido em uma direção fixa e no seu percurso pode encontrar alguma superfície refletora. Caso isto ocorra, o feixe é refletido de forma especular e volta ao sensor, onde é registrado pela câmara. Dependendo da distância à que o ponto refletor se encontra (D1 ou D2), o retorno é registrado em uma linha diferente no plano do sensor CCD ou CMOS da câmara. Fazendo as devidas abstrações, pode-se verificar que o feixe laser percorre uma trajetória que une três pontos, saída do emissor, ponto refletor, ponto de incidência no CCD. Como o CCD e o emissor estão devidamente alinhados, esta trajetória conforma um triângulo, com algumas grandezas conhecidas:

- A distância entre o emissor e o ponto principal da câmera (base);
- Os parâmetros da orientação interior da câmera;
- O ângulo entre o emissor e a câmera.

Com isto, é possível, conhecendo-se o local onde o ponto refletido incide no CCD, calcular a distância entre o sistema e o ponto refletor, tomando como origem o centro da lente da câmara.

Estes sistemas são altamente precisos, porém tem um alcance limitado, devido à dimensão da base. São usados em trabalhos de curta distância, como em scanners de mesa.





LiDAR - Laser scanner: tempo de propagação

Baseia-se na medição do tempo entre a emissão e o retorno do pulso refletido. Como é mostrado na figura ao lado, um pulso laser é emitido em direção ao objeto. O instante no qual o pulso é emitido é registrado (t_1). O laser se propaga até o objeto e é por ele refletido. Parte do pulso refletido volta para o sistema de medição. Note que, devido à reflexão difusa ou absorção, a parcela do pulso que é refletida é mais fraca que o pulso emitido. O laser então se propaga de volta até o sistema de medição, onde é registrado o instante no qual ele retorna (t_2), bem como a intensidade deste pulso de retorno.

O tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno é $dt = (t_2 - t_1)$. Como a radiação eletromagnética se propaga a velocidade constante (**c=velocidade da luz**), então,

$$(dx)c = dx/dt \dots \rightarrow dx = c * dt$$

Como o laser viajou de ida e volta ao objeto, ele percorreu a distância que separa o varredor laser do objeto duas vezes, $dx = 2 * R$, logo, a distância do objeto em relação ao sensor é de: $R = c * dt/2$

A questão central é então: *Como medir o tempo?*
Para isto existem duas alternativas:

- O sistema de pulsos (Pulsed laser scanning)
- o sistema de onda contínua (Continuous wave laser scanning).



LiDAR - Laser scanner: onda contínua

onda contínua

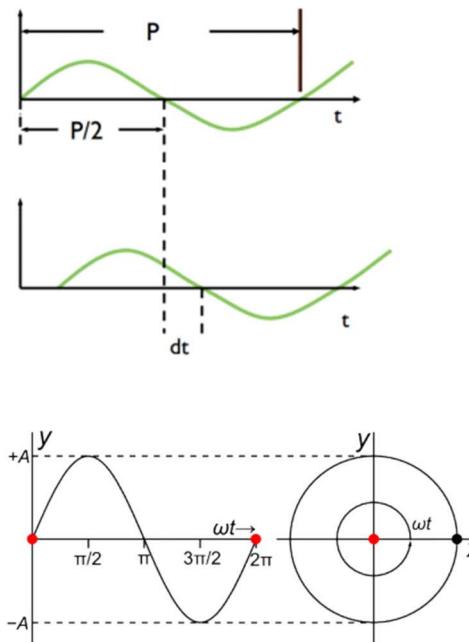
Os sistemas de **onda contínua** não emitem pulsos, como no exemplo do slide anterior. Estes sistemas emitem uma onda, com frequência e amplitude conhecidas, sem interrupção (contínua). A onda se propaga pelo ar na direção do objeto e é por ele refletida. De novo, parte desta onda volta para sensor, onde sua oscilação é medida. Então, no sensor tem duas ondas: uma de saída e outra do retorno. As duas ondas tem a mesma frequência, porém elas se encontram defasadas no tempo, pois a que retornou da superfície se encontra atrasada. O atraso se deve ao fato desta onda ter percorrido a distância entre o sensor e o objeto duas vezes, gastando tempo.

Quanto mais distante se encontra o objeto do sensor, maior é a diferença de fase. Então, se conhecermos a diferença de fase entre a onda sendo emitida e o retorno poderíamos calcular a distância entre o sensor e o objeto.

Considere a animação ao lado. Percebe que para completar um ciclo (percorrer uma distância igual ao um comprimento de onda), a onda necessitou um certo tempo **P**, ou período? Nesse intervalo, segundo a animação ao lado, foi varrido um ângulo 2π . Logo: $P \sim 2\pi$. O atraso da onda de retorno é proporcional à diferença de fase $\Delta\Phi \sim D\Delta t \sim DF$. Combinando estas relações: $dt = DF \cdot P / (2\pi)$. Ou em termos de frequência $dt = DF / (2\pi \cdot freq)$. Como nesse intervalo a onda percorreu a distância sensor/objeto **R** duas vezes, $R = c \cdot dt / 2$.

$R = c \cdot DF / (4\pi \cdot freq)$ Quando a diferença de fase é igual ou maior a **P**, é impossível saber quantos ciclos foram

completados. Assim sendo, apenas distâncias associadas a diferenças entre zero e **P** são medidas. O alcance do sistema pode ser aumentado usando ondas com maior comprimento de onda, ou menor frequência.

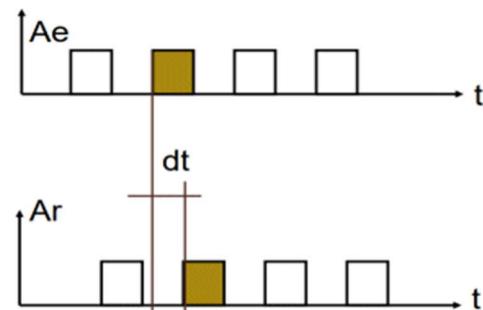


fonte: www.askiitians.com/iit-study-material/iit-jee-physics/oscillation/



LiDAR - Laser scanner: pulse ToF

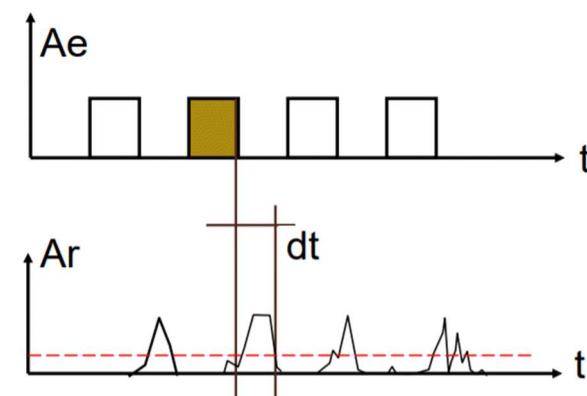
Consideremos a emissão de pulsos discretos de laser. Isto pode ser representado como uma onda quadrada, mostrada ao lado. Ao longo do tempo (t) pulsos (Ae) são emitidas em pequenos intervalos, espaçados por intervalos constantes. Após atingir o objeto, estes pulsos voltam ao sensor (Ar), mas atrasados, com uma diferença de tempo dt .



Para detectar quando o pulso retorna ao sensor é medida a potência do retorno ao longo do tempo. Assim que uma potência superior a um limiar for registrada é considerado que o pulso retornou. O problema é que o pulso de retorno é fraco, pois o pulso incidente pode ser espalhado em várias direções na superfície do objeto. Além disso, ele não

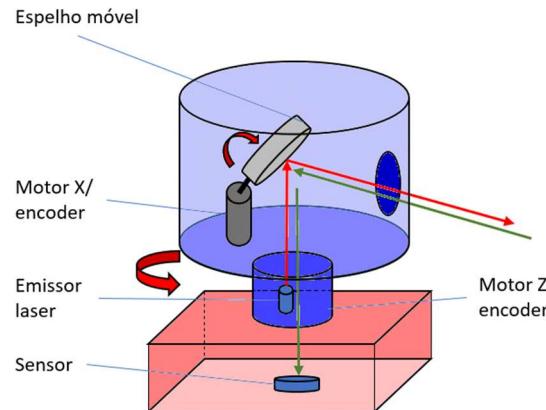
necessariamente volta como uma onda quadrada, pois pode ser fortemente afetado pela geometria do objeto. Considerando também que existe ruído no sinal de retorno, a identificação do momento em que o pulso retorna se torna uma tarefa difícil. Na figura a seguir é ilustrada uma situação onde ocorre ruído e o pulso volta fraco e deformado.

Você nota que tem 4 pulsos emitidos e 4 retornos? O retorno mais à esquerda é quase uma onda triangular, curta. Mas... O que você diria do terceiro? pode se dizer que o pequeno pico é ruído? ou é parte do sinal? E do quarto? Como explica que existem vários picos?





LiDAR - Laser scanner: varredura



Esquema do sistema de varredura. Adaptado de (www.renishaw.com.br)

O processo de medição descrito, por tempo de propagação, explica como medir a distância (**R Range**) em relação ao sensor, mas ainda falta calcular a posição. A posição do ponto depende de: a distância **R**, a posição do sensor (**x₀,y₀,z₀**) e a orientação do sensor (**MR**).

$$X = X_0 + MR * R$$

- **X₀** é o vetor $(x,y,z)'$ da posição do sensor;
- **MR** representa a matriz de rotação do sensor e
- **R** a distância medida pelo aparelho.

Em uma situação simples, o sensor pode ser instalado em uma base nivelada (um tripé, por exemplo), com o que duas rotações são anuladas, sendo possível girar o aparelho apenas em torno do eixo vertical. Porém, nesta situação, apenas pontos na altura do aparelho poderiam ser medidos.

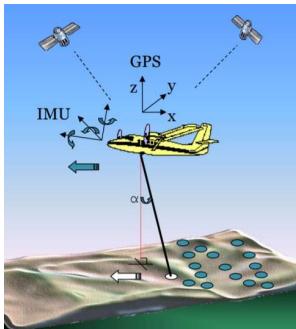
Com ajuda de um espelho móvel, é possível apontar o laser a diferentes locais, desviando o feixe laser em torno do eixo **x**, o que significa realizar a varredura transversal (de cima para baixo). Isto pode ser representado introduzindo uma segunda matriz de rotação **ML** que representa a rotação apenas em torno do eixo **x**. Isto resulta em:

$$X = X_0 + MR * ML * R$$

Como o espelho pode ainda ser girado em torno do eixo vertical, utilizando o segundo motor, é possível efetuar a varredura em duas direções, o que permite cobrir uma área na frente do sensor.



LiDAR - Laser scanner: Sistemas aerotransportados



Sistema de varredura aerotransportado.

Neste caso, o sistema é instalado em uma plataforma aérea, geralmente um avião, que o carrega para sobrevoar a superfície do terreno e assim obter um modelo digital da superfície da terra. O sistema de varredura é instalado no interior do avião e apontado para baixo, medindo na direção vertical. Nesta situação, a posição e atitude (ângulos de rotação) do sistema são variáveis e dependem da trajetória e condições do voo.

A questão da posição

Como a posição do avião muda a cada instante, é necessário determinar a posição instantânea do sensor com ajuda de receptores GPS/GNSS.

A questão da atitude

É impossível manter a plataforma aérea perfeitamente nivelada, pois ela sofre vibrações e rotações devido ao deslocamento, vibrações dos motores, vento, etc. Por isso,

é necessário determinar a atitude do sistema a cada instante, o que é feito, na prática, usando um dispositivo auxiliar, um sistema de medição inercial (Inertial Measurement Unit - IMU) , que mede os ângulos de rotação em torno dos três eixos.

Como estes dispositivos auxiliares são relativamente grandes, existem deslocamentos entre os três dispositivos de medição: scanner/GPS, Scanner/IMU; GPS/IMU

A determinação das coordenadas de cada ponto, então, deve levar em consideração estas novas variáveis

$$X = X_{gps} + MR * P + MR * Ma * ML * R$$

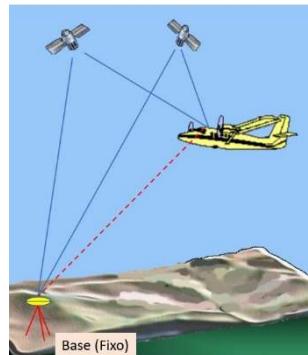
- X_{gps} : posição dada pelo GPS
- MR : rotação da plataforma
- P : deslocamento entre o varredor e a antena GPS, localizada no topo do avião.
- Ma : rotação entre o varredor e o sistema inercial
- Lm : ângulo de emissão do laser, geralmente caracterizado pela varredura transversal à linha de voo.
- R : Distância medida pelo varredor

Como a determinação d a posição do ponto medido depende dos sistemas auxiliares (GPS/IMU), a acurácia de todo o sistema também é afetada pela acurácia destes dispositivos e pela correta medida do deslocamento entre dispositivos e seu correto alinhamento. Por este motivo, uma etapa de calibração do sistema precede cada missão, com o objetivo de diminuir os erros.



LiDAR - Laser scanner aerotransportado - posição

Os alunos de Engenharia Cartográfica da UFPR aprendem posicionamento por satélite em detalhe em uma disciplina específica. Aqui são apresentadas apenas noções de como esta tecnologia é usada no contexto de LiDAR aerotransportado.



O sistema de posicionamento por satélite global (Global Positioning System - GPS) calcula a posição do usuário usando um receptor que recebe informações de uma rede de satélites artificiais localizados em torno da terra, através de trilateração. Os sinais emitidos pelos satélites em torno da Terra podem ser captados por um receptor GPS usando uma antena instalada no topo da aeronave. O sinal contém informações como parâmetros orbitais e tempo.

Com base no sinal recebido, é possível calcular a distância entre o satélite e a antena do receptor, mas com apenas um único satélite não é possível calcular a localização da antena. Porém, com os sinais de três satélites, mínimo, dado que a posição dos satélites é conhecida, torna-se possível

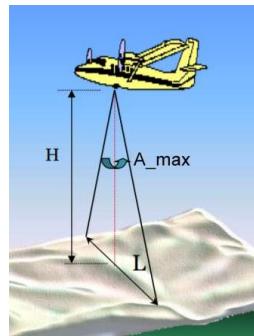
combinar as três medidas de distância para determinar a posição da antena.

GPS diferencial

Para reduzir os erros na medição e aumentar a acurácia posicional, a técnica mais recomendada é o **GPS Diferencial**. Isto consiste em usar dois receptores GPS, um instalado no avião, móvel, e um instalado em um ponto com coordenadas conhecidas na terra (fixo). Como os dois receptores se encontram próximos, os erros que afetam um se repetem no outro. Então pode-se calcular os erros com base nos dados do receptor fixo e corrigir os dados captados pelo receptor móvel.

Um problema do uso dos sistemas de apoio GPS e inercial é que estes sistemas tem baixa taxa de coleta de dados em relação à elevada taxa de coleta do varredor a laser e, para poder calcular a posição de todos os pontos medidos pelo varredor, é necessário realizar interpolações entre medidas reais, o que pode introduzir erros. Por exemplo, o receptor GPS mede um ponto por segundo e nesse intervalo o varredor pode ter lido em torno de 150 pontos ou mais, dependendo da frequência de coleta do dispositivo.

Embora a acurácia dos equipamentos usados seja alta, pequenos erros são significativos quando se considera que o cálculo da coordenada do ponto é resultado da simulação da projeção do feixe a uma altura em torno de 1000 metros. uma pequena variação angular, por exemplo, pode ser traduzida em um deslocamento significativo na superfície do terreno em função da altura do avião.



Sistema LiDAR aerotransportado sobrevoando uma área de bosque. Em algumas regiões, menos densas, o feixe laser pode atingir o terreno.

Nos sistemas aerotransportados, o laser é apontado para baixo e para fazer a varredura do terreno um espelho é usado para redirecionar o laser na direção perpendicular à linha de voo, conforme o esquema ao lado. O espelho redireciona o laser para esquerda e direita, efetuando a varredura transversal dentro de uma faixa angular programada pelo operador do levantamento, o Engenheiro Cartógrafo.

A largura (L) da faixa varrida depende da altura de voo e o ângulo de abertura do varredor.

LiDAR planejamento

$$L = 2 * H \tan(0,5 * A_{\text{máx}})$$

Deve-se também calcular a quantidade de Pontos por linha

$$(Np):Np = f / (2 * r)$$

- **f:** Taxa de amostragem (Hz). Taxa ou frequência de repetição do pulso.
- **r:** Frequência de varredura (scan rate), em Hz. Número de linhas varridas por segundo.

Com base no número de pontos por linha é possível calcular a *distância entre pontos Dp* ao longo da linha varrida (perpendicular à linha de voo):

$$Dp = L/N$$

- **L:** Largura da faixa
- **N:** Pontos por linha.

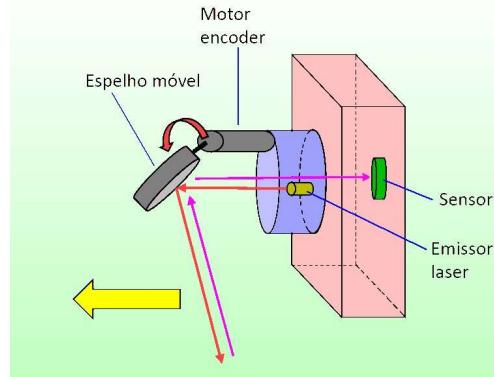
A *distância entre pontos ao longo da linha e vôo DI* depende da velocidade da aeronave e a velocidade, ou frequência, com que as linhas são varridas. Se a aeronave se deslocar muito rápido, as linhas serão mais separadas, diminuindo a densidade de pontos coletados:

$$DI = v / f$$

- **v:** velocidade da aeronave
- **f:** Taxa de amostragem



Padrões de varredura

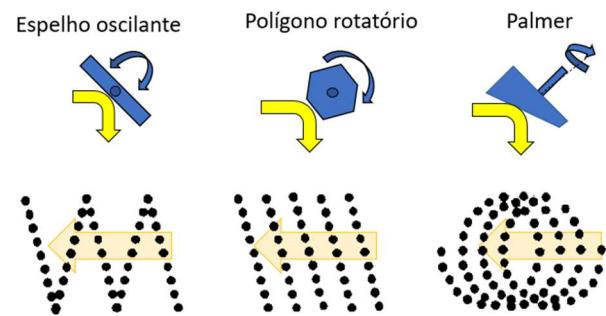


Esquema de um sistema de varredura por espelho móvel.

Como a aeronave se desloca para frente e a varredura é na direção transversal ao deslocamento da aeronave, o laser é projetado na superfície do terreno seguindo um padrão de Zig-Zag. Porém, esta não é a única alternativa de varredura. A seguir são mostrados três sistemas de varredura junto com o padrão que eles produzem na superfície do terreno:

- **Espelho oscilante:** Como o espelho vai e volta, o padrão no terreno é zig-zag.
- **Polígono rotatório:** Este tipo de espelho gira constantemente em uma direção, o que lhe confere maior continuidade, e cada face produz uma linha no terreno. Assim, o padrão resultante é de linhas paralelas.
- **Palmer:** O espelho tipo "Palmer" é um espelho que gira fora de seu eixo. O eixo de rotação, neste caso, é inclinado em relação à superfície do espelho. Isto produz um padrão circular no terreno. Junto com o movimento da aeronave, o padrão resultante é helicoidal.

Existe ainda sistemas que usam fibras ópticas para efetuar uma varredura mais uniforme, pois o uso de espelhos sempre pode trazer inconstância no movimento, porém não são tão comuns no Brasil.



consulte [Airborne laser scanning—an introduction and overview, Wehr & Lohr \(1999\)](#). ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 68–82.



First/Last pulse

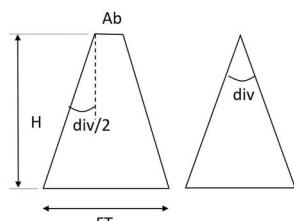
Diâmetro do pulso (Footprint)

Embora se diga que o feixe laser se propaga de forma paralela, isto não é completamente verdade, pois o feixe apresenta uma pequena divergência. O problema é que, mesmo pequena, a divergência do feixe tem como consequência que a projeção do feixe laser na superfície cresça com a distância. Considerando que um levantamento LiDAR é efetuado em alturas em torno de 1000m, então a projeção do feixe atinge proporções em torno de 15-30 cm. O tamanho do **footprint (FT)** pode ser calculado, pois o ângulo de divergência do emissor é conhecido, em função da altura de voo (**H**) e o ângulo de divergência **div** e o tamanho da abertura do emissão (**Ab**):

$$FT = Ab + 2 * H * \tan(div/2)$$

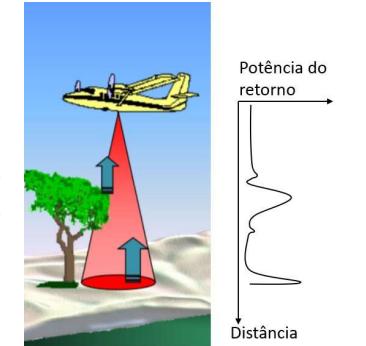
Segundo Balsavias (1999), como a abertura é relativamente pequena de fábrica (~10–15 cm) e como também o ângulo de divergência é pequeno, esta relação pode ser simplificada:

$$FT = H * div, \quad \text{com } div \text{ em radianos.}$$



Primeiro / Último pulsos

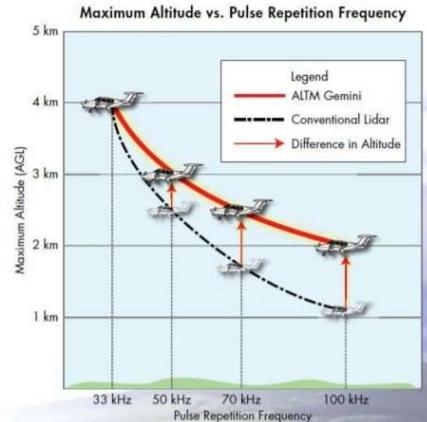
Uma das consequências da abertura do feixe emitido é que, como atinge dimensões em torno de 10 cm no terreno, quando disparado desde uma aeronave, ele pode ser refletido por mais de uma superfície. Por exemplo, quando o feixe laser chega na copa de uma árvore não muito densa, então parte do feixe é refletido pelas folhas no topo da árvore. Outra parte do feixe passa pela copa, atravessando os vazios, e pode chegar no terreno. Como consequência, o sensor recebe dois retornos, um causado pelo topo da árvore e outro pelo solo. Isto pode ocorrer também nas bordas dos telhados.



Tendo em consideração este fenômeno, os sensores modernos foram projetados para medir o primeiro e o último pulso, com a finalidade de estimar a altura dos objetos, como vegetação ou prédios. Com o passar do tempo, a quantidade de retornos medidos foi incrementada e hoje existem sensores que medem múltiplos retornos, o que permite traçar um perfil vertical de alguns objetos, principalmente áreas de vegetação.

Full wave

Os mais modernos sensores fornecem o perfil completo do sinal de retorno. Eles são dotados de um digitalizador que amostra o sinal de retorno captado e armazena um grande número de pontos ao longo deste perfil. Uma das desvantagens destes sistemas é a quantidade de memória e tempo de processamento necessários para processar e armazenar esta informação. Por isto, mesmo tendo esta opção, muitas vezes não é usada nos levantamentos mais simples por questão de economia.



Multi-pulse

Os novos sistemas podem operar em modo multipulso (ex: Gemini Optech). Neste caso, o sistema continua disparando pulsos mesmo quando o primeiro ainda está em voo para o receptor. Isto permite ainda elevar a altura de coleta de dados. Porém é necessário aumentar a potência da emissão do laser. Outra vantagem é a possibilidade de obter um levantamento mais denso (mais pulsos).

de visão dinamicamente durante o voo. Pra isto, o sistema estima sua altitude acima do terreno durante o voo.

Laser scanner Multi-pulso

Dois varredores podem ser usados, em sincronia, para aumentar a quantidade de pontos na superfície do terreno.

Com os sensores anteriores, o mapeamento topográfico de alta densidade em locais com relevo era dificultado pela impossibilidade de diminuir a distância entre os pontos. As principais restrições estavam associadas à impossibilidade de aumentar a frequências emissão de pulsos ou diminuir significativamente a altura de voo. Usando dois varredores é possível aumentar o número de pontos, a densidade do levantamento. Os sensores então são limitados apenas pela potência do laser e a sensibilidade do receptor. Porém existem algumas restrições que ainda devem ser consideradas. Pode ocorrer confusão entre os dois emissores/sensores se eles não forem adequadamente sincronizados. Por isso, sua operação conjunta está condicionada pela altura de voo. Em algumas alturas, o uso da técnica multi-pulse não é recomendado, pois aparecem áreas ditas "cegas", de confusão.

Mais recentemente, este problema vem sendo solucionado. Por exemplo, a Optech desenvolveu o sistema PulseTRAK, que permite eliminar a ocorrência de zonas "cegas" e aumentar com isso a densidade do levantamento.

O sistema é capaz de se adaptar às mudanças de elevação do terreno, ajustando o campo

consulte [Lidar Technology Breakthrough Yields 25% Increase in Collection Efficiency](http://www.lidarnews.com). LiDAR News Magazine, Vol. 5, No. 4. www.lidarnews.com



LiDAR – Extração de MDT

O feixe laser poderia atingir o solo?

É possível, mediante algoritmos de computador, separar os pontos que atingiram o terreno daqueles que foram refletidos por árvores ou prédios, o que permite estimar a variação do terreno mesmo em áreas cobertas por vegetação, como bosques. Porém, Se o bosque for muito denso, a penetração do laser é mínima e poucos pontos chegam no terreno. Uma forma de estimar a viabilidade do uso de laser scanner para esta finalidade é verificar se a luz solar penetra na floresta. Na fotografia abaixo é mostrada uma região do bosque do centro Politécnico da UFPR. Nota-se que existem clarões entre a vegetação, então espera-se que alguns feixes de um levantamento laser atinjam o terreno. Porém, na outra fotografia, é visto que também existem outros obstáculos além do topo da vegetação, como troncos e folhas, que podem fornecer informações erradas.

Nesta serão apresentados métodos de classificação dos pontos disponíveis em duas classes: solo e não-solo. Como os pontos apenas tem suas coordenadas (x, y, z) e não temos informação da cor do objeto atingido, a classificação destes pontos se baseia principalmente no aspecto geométrico e a relação entre pontos vizinhos.





A figura mostra uma nuvem de pontos obtida por laser scanner aerotransportado (vermelho) e um conjunto de pontos obtidos por topografia (azul). Nota-se que muitos pontos foram refletidos pelo topo das árvores, mas que outros conseguiram penetrar e chegaram ao solo. Porém, os que chegaram ao solo não apresentam uma distribuição regular e tem locais com muitos pontos e outros com poucos.

Se conseguimos separar os pontos que atingiram o solo, como é mostrado na figura ao lado, poderíamos interpolar um modelo que represente a variação do terreno. Bem, aqui temos que definir bem os modelos.

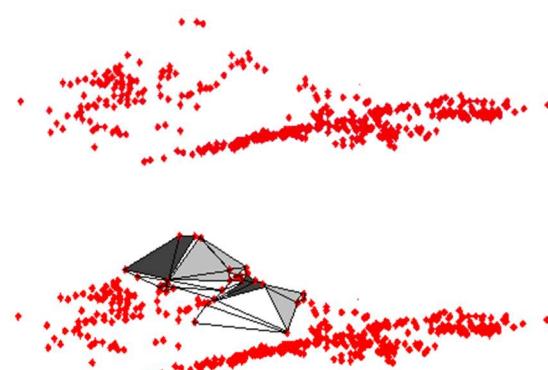
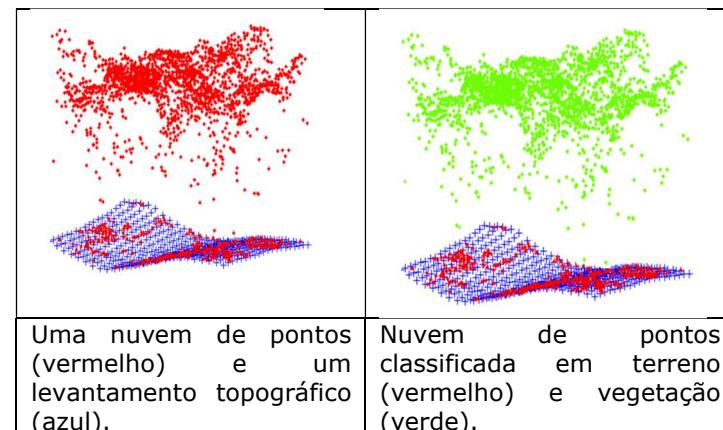
- o modelo do terreno (MT) é formado pelos pontos que atingiram o terreno e representa a variação topográfica no local.
- o modelo de superfície (livre) (MS) é formado por todos os pontos do levantamento LiDAR, e representa o topo de árvores, prédios e solo não coberto por vegetação.

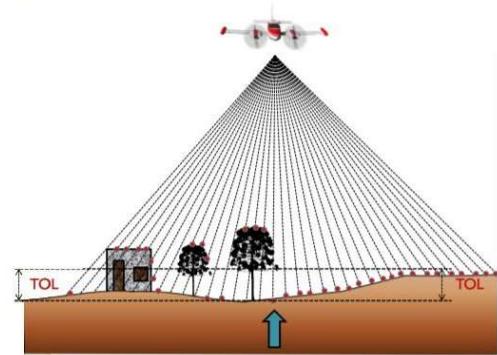
Destes dois modelos pode ser derivado um terceiro, o modelo de elevação (ME), ou altura dos objetos, fazendo a diferença entre $ME = DS - DT$.

A seguir são mostradas duas figuras. Na primeira é mostrado o conjunto de pontos do terreno, resultado da classificação. Na segunda é mostrado um exemplo de como estes pontos podem ser usados para produzir um modelo do terreno. Neste caso, o modelo é formado

O problema - MDT

juntando pontos próximos com triângulos. Este modelo é então uma malha triangular ou TIN (triangular irregular network).





Se um ponto é do terreno, ele é o mínimo.

No exemplo ao lado encontra-se representado um trecho de um levantamento LiDAR aerotransportado. Alguns pontos foram interceptados pela vegetação ou construções e a interpolação de um modelo não refletiria a variação do terreno.

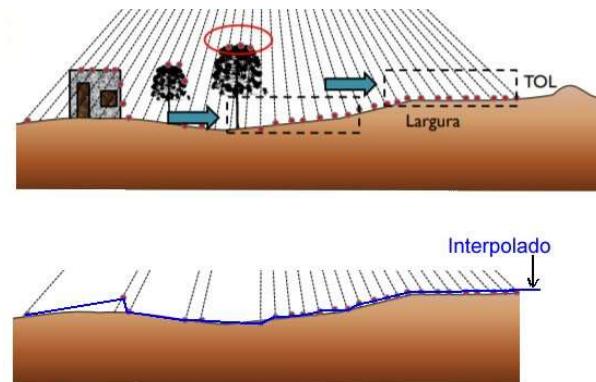
Para detectar os pontos no terreno é assumido que, se pelo menos um ponto atingiu o solo, esse ponto tem a cota mínima. Como a variação do terreno não é abrupta, é ainda suposto que outros pontos com cota parecida ao mínimo na proximidade também podem ser considerados do terreno. Claro, que, na medida em que a distância ao ponto mínimo cresce, a probabilidade desta suposição diminui. Ela é válida só na região mais próxima ao mínimo.

LiDAR - Mínimo do bloco

Então, o método consiste em delimitar uma região na nuvem e detectar o mínimo, considerando este ponto como sendo do terreno. A seguir é fixado um limite de tolerância na direção vertical e todos os pontos na região cuja cota seja próxima ao mínimo são considerados como do terreno. Aqueles com cotas mais altas são descartados.

$$H < \text{MIN} + \text{TOL}$$

Esta análise é repetida, deslocando a região ao longo de toda a nuvem de pontos. Os pontos classificados como "terreno" são então usados para interpolar um modelo digital da superfície do terreno. Este modelo é chamado também de MDT Modelo Digital do Terreno. A escolha do melhor limiar de **TOL**-erância depende do relevo. Em locais planos o valor pode ser pequeno. Já em locais acidentados deve-se usar uma tolerância maior.





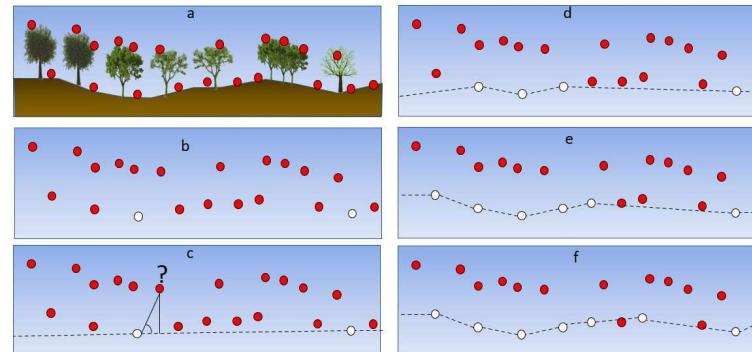
Adensamento progressivo Axelsson (2000)

Este método consiste em formar um modelo do terreno simples e progressivamente adensar o modelo incluindo mais pontos. Para isto, se começa com um pequeno número de pontos que gera uma primeira aproximação de superfície sob forma de uma grade TIN. Uma opção pode ser a adoção dos pontos mais baixos (mínimos locais). Em iterações sucessivas, todos os pontos são analisados e é medida a proximidade dos pontos ao modelo vigente. Caso o ponto se encontre próximo do modelo, considerando uma tolerância de proximidade, ele é adicionado ao modelo, aumentando com isto o grau de detalhe. Como cada adição de pontos gera um novo modelo, este processo é repetido até que nenhum ponto seja adicionado.

A questão central aqui é como medir a proximidade. Uma opção seria considerar a diferença de cota, mas esta opção pode falhar se os pontos estão muito distantes do mínimo local.

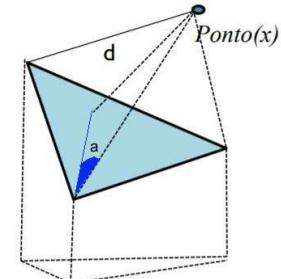
Outra opção é analisar a **declividade**, como é mostrado na figura "c" abaixo. Nela, um modelo inicial foi obtido com base nos dois pontos mínimos detectados. Esse modelo é mostrado como linha tracejada. Então, no seguinte passo, a declividade entre o ponto em questão e um dos pontos do modelo é medida. Se essa declividade for alta, é assumido que se trata de uma árvore ou prédio. Se for pequena, é assumido que ela condiz com o relevo e o ponto é considerado como sendo do terreno.

No exemplo é mostrado como, a cada inclusão, o modelo se aproxima mais da topografia local.



Na prática a análise é feita em 3D. Então, a proximidade do ponto ao modelo é quantificada da seguinte forma:

- É identificado em qual triângulo se situa o ponto.
- Com os três pontos do triângulo se define um plano no espaço 3D.
- É quantificada a distância ponto-plano "d" e os ângulos entre o plano e a reta que une o ponto a cada vértice, "a".
- Com esta informação é decidido se o ponto é anexado ou rejeitado.



A proximidade de um ponto a um modelo 3D triangular pode ser medida em função da distância do ponto ao plano.

FIM