

Autocalibração de um sistema laser scanner terrestre: uma abordagem conceitual

Victor Alvarenga Carvalho¹, Sabrina Paes Leme Passos Correa², Afonso de Paula dos Santos¹

¹Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Viçosa – MG – Brazil

²Divisão de Processamento de Imagens – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
São José dos Campos – SP – Brazil

{victor.alvarenga, afonso.santos}@ufv.br, sabrina.correa@inpe.br

Resumo. *Este estudo tem como objetivo investigar a autocalibração automática de um Laser Scanner Terrestre (LST), equipamento que tem vasta aplicabilidade em medições de alta acurácia. Nuvens de pontos simuladas com a presença de erros sistemáticos conhecidos são submetidas a ajustamento de observações, via método dos mínimos quadrados por um algoritmo desenvolvido que permite conhecer e minimizar tais erros sistemáticos. O objetivo deste trabalho é proceder uma autocalibração de LST baseado na literatura já existente e comparar os resultados deste processo com os erros inseridos na simulação.*

Abstract. *This study proposes the investigation of an automatic selfcalibration of a Terrestrial Laser Scanner (LST), equipment with broad applicability in high accuracy measurements. Simulated point cloud with known embedded systematic errors are submitted to a least square adjustment observation by a developed algorithm aiming to identify and minimize such systematic errors. This study goal is to proceed a LST selfcalibration based on existing literature and compare the outcomes with those known inserted errors.*

1. Introdução e Objetivos

Um Laser Scanner Terrestre (LST) é um LiDAR (*Light Detecting and Ranging*) estático que tem a capacidade de gerar modelos digitais tridimensionais da superfície terrestre com ampla aplicação em mapeamentos, onde há necessidade de se obter uma alta confiabilidade [Leonartovicz 2013].

Conhecer e minimizar os erros sistemáticos de um LST, por meio de uma calibração permite conferir alto rigor de acurácia nas aplicações de engenharia. A autocalibração, segundo [Lichti 2007], é uma metodologia que propõe realizar uma inspeção do equipamento utilizando os próprios dados coletados. Na literatura, até o presente momento, são apresentadas três abordagens de autocalibração: ponto a ponto, baseada em plano e baseada em cilindros [Corrêa et al. 2017].

Dando destaque à metodologia ponto a ponto, sua vantagem é a modelagem de dados mais simples. Logo, não é necessário trabalhar formulações para a identificação e correspondências entre figuras geométricas como no método por planos [Chow et al. 2011]. Em contrapartida, é preciso de pontos de referência livres de erros, ou próximo disso.

Desta forma, a proposta deste trabalho é realizar a autocalibração ponto a ponto de uma nuvem simulada, que se assemelha a uma nuvem gerada por levantamento real, com a inserção de erros sistemáticos conhecidos para replicar um LST não calibrado. Ao final, os resultados dos erros sistemáticos obtidos no processo de autocalibração serão comparados aos os valores conhecidos. Vale ressaltar que este é um estudo em andamento e os resultados apresentados são iniciais.

2. Geração de Dados Simulados

Para gerar os dados simulados, deve-se conhecer a configuração de uma autocalibração real, onde os alvos (centroides) devem estar bem distribuídos pelas paredes, teto e chão. Esta distribuição visa gerar uma boa rigidez geométrica de forma que se obtenha um ajustamento de observações estável [Lichti 2007]; [Reshetyuk 2009].

Deve-se notar que o ambiente para autocalibração de um LST é controlado, geralmente realizado em sala fechada, onde suas dimensões influenciam diretamente na rigidez geométrica do ajustamento [Borges 2017], [Vosselman and Maas 2010]. Com o uso do ambiente MATLAB, é criada uma a nuvem simulada com 144 pontos (x,y,z) distribuídos em todas as faces de um cubo de lado de 10 metros, 24 pontos por face, como mostrado na (Figura 1).

Além disso, os erros sistemáticos (parâmetros adicionais, APs) inseridos são na ordem dos milímetros, o que corresponde a valores nominais de LST disponíveis no mercado e os encontrados na literatura (ver [Reshetyuk 2009], [Chan and Lichti 2012]).

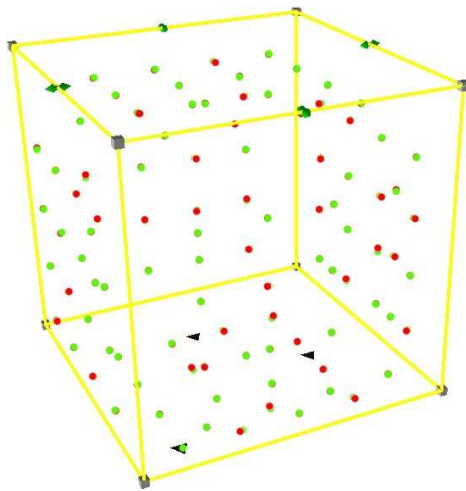


Figura 1. Vista em perspectiva do modelo simulado: em triângulos as estações do LST simuladas; os círculos verdes como os alvos ajustados e círculo vermelho como os alvos de referências.

Na simulação criou-se três estações de localização do LST (Figura 1). Assim, tem-se um conjunto de quatro nuvens de pontos: a nuvem de pontos do espaço-objeto (denominada referência), três nuvens de pontos de cada outro scan em seu próprio sistema de coordenadas (denominado de espaço-scan, nomenclatura dada de acordo com [Lichti 2007];[Borges 2017]) com erros sistemáticos igualmente aplicados.

As nuvens de pontos dos scans foram geradas a partir de uma transformação de corpo rígido aplicando rotações e translações. Já os erros sistemáticos (APs) foram inseridos considerando os parâmetros de alcance, rotação no plano horizontal e vertical.

3. Processamento dos Dados

Primeiramente, as nuvens de pontos passam pelo processo de registro, onde é realizado um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), utilizando o modelo paramétrico. Logo após, é realizado o ajustamento com os erros sistemáticos (parâmetros adicionais, APs) inseridos no modelo, para que estes erros sejam identificados e o sistema LST, calibrado. Segundo [García-San-Miguel and Lerma 2013], esta sequência é fundamental para a determinação dos APs.

3.1. Registro

Conforme os conceito de fotogrametria, o registro transporta todas as nuvens de pontos para um único sistema de coordenadas - sendo este arbitrário ou não - denominado espaço-objeto [Coelho and Brito 2007]. Esse processo é similar para dados de LST, a nuvens de pontos no espaço-objeto deve ser ajustada em relação a um sistema de referência passível de materializar [Lichti 2007].

A Orientação Exterior, utiliza a transformação de Corpo Rígido, que se baseia em rotações e translações. A determinação dos parâmetros de orientação exterior (EOP), expressos na Equação 1, consiste em três rotações $(\kappa_j, \omega_j, \phi_j)$, três translações $(\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j)$, e escala definida implicitamente através de observações de alcance.

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j) \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

onde,

(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) são as coordenadas do ponto i no espaço-scan j ;

R_1, R_2, R_3 são as matrizes de rotação nos eixos X, Y e Z, respectivamente;

(X_i, Y_i, Z_i) são as coordenadas do ponto i no espaço-objeto;

$(\kappa_j, \phi_j, \omega_j)$ são os ângulos de rotação do espaço objeto para o espaço-scan;

$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ são as coordenadas da posição do scan j no espaço-objeto.

Ressalta-se que o registro foi feito por um ajustamento em bloco (*bundle block adjustment*), ou seja, todas as nuvens de pontos foram registradas simultaneamente, como mostrado por [Coelho and Brito 2007]. Este fato confere a característica de um ajustamento de observações com maior grau de liberdade e maior rigidez geométrica, sendo ele mais estável [García-San-Miguel and Lerma 2013].

A equação acima pode ser representada na forma $L = F(X)$, que é definida no modelo paramétrico, utilizando o MMQ [Gemaël 1994], aplicada resulta no encaixe das nuvens de pontos. Neste processo de ajustamento, o vetor das observações (Lb) são os *tie points*, coordenadas cartesianas de cada ponto presente simultaneamente em todas as nuvem no espaço-sacan, (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) , enquanto o vetor dos parâmetros (X) são os ângulos de rotação e as coordenadas no espaço-objeto de cada scan, os EOPs $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \omega, \phi, \kappa)$.

A matriz peso levou em consideração a precisão nominal de um equipamento real. Não obstante, a redundância do modelo é dada pela subtração entre o número de observações ($3 \cdot \text{numero_scans} \cdot \text{numero_pontos}$) e o número de parâmetros ($6 \cdot \text{numero_scans}$).

Considera-se, para este caso que o equipamento esteja nivelado e centrado em um ponto predefinido. Para parâmetros iniciais aproximados (X_o), as traslações são as coordenadas dos scans no espaço-objeto; já as rotações, em torno dos eixos X e Y (ω e ϕ , respectivamente), são inicialmente zero [Lichti 2007].

Em contrapartida, a rotação em torno do eixo Z (κ) será definida como a variação angular entre dois scans na projeção perpendicular ao eixo Z (plano XY) no espaço-objeto. Como este modelo é conceitual e preliminar, não houve inserção de erros grosseiros e aleatórios, o processo de detecção de *outliers* não foi realizado. Todavia, enfatiza-se sua necessidade em uma autocalibração.

3.2. Ajustamento com Parâmetros Adicionais

O objetivo deste processo é refazer o ajustamento exposto no item anterior adicionando os erros sistemáticos do sistema LST. As correções são feitas em distâncias e ângulos, portanto é importante parametrizar em função de coordenadas polares [Lichti 2007]. Esta parametrização é mostrada nas Equações 2, 3 e 4.

$$\rho_{ij} = \sqrt{dx_{ij}^2 + dy_{ij}^2 + dz_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (2)$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{dy_{ij}}{dx_{ij}} \right) + \Delta\theta \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{dz_{ij}}{\sqrt{dx_{ij}^2 + dy_{ij}^2}} \right) + \Delta\alpha \quad (4)$$

As variáveis $\Delta\rho$, $\Delta\theta$ e $\Delta\alpha$ representam os erros sistemáticos, denominados aqui parâmetros adicionais (APs). Os APs podem ser subdivididos em três classes: a_0 a a_8 são os parâmetros do alcance, b_1 a b_7 são relacionados ao ângulo horizontal e, por fim, c_0 a c_4 são relacionados ao ângulo vertical [Chow et al. 2012], [Lichti 2007].

A escolha e utilização dos APs deve ser criteriosa, pois é possível que haja alta correlação entre si e entre EOPs, criando uma combinação linear e, portanto, um ajustamento sem solução [Lichti 2010]. Com isso, caso haja singularidade, torna-se necessária a remoção de parâmetros adicionais fortemente correlacionados [Corrêa et al. 2017].

Os principais parâmetros são: o *offset* de distância (a_0); erro do círculo da vertical (c_0); erro do eixo do limbo horizontal (b_2) e erro do eixo de colimação (b_1) [Corrêa et al. 2017], [Reshetyuk 2009], [Lerma and García-San-Miguel 2014]. Estes parâmetros definem as variáveis dos erros sistemáticos da seguinte forma; ($\Delta\rho = a_0$; $\Delta\theta = b_1 \sec(\alpha_{ij}) + b_2 \tan(\alpha_{ij})$; $\Delta\alpha = c_0$).

Desta forma, o modelo funcional será em função de, além dos EOPs, também dos APs, gerando a Equação 5, que é a transformação de corpo rígido com coordenadas

parametrizadas e os erros sistemáticos do sistema laser scanner inseridos.

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = M_j \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta\rho)\cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha)\cos(\theta_{ij} - \Delta\theta) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho)\cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha)\sin(\theta_{ij} - \Delta\theta) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho)\sin(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. Resultados

Como resultados preliminares, há os parâmetros (EOPs e APs) utilizados nas nuvens simuladas na parte superior da Tabela 1; na parte do meio encontram-se os resultados do registro, enquanto na parte inferior encontram-se os resultados do ajustamento com APs.

Por não considerar os erros sistemáticos no seu modelo funcional, entende-se que o Registro não representa satisfatoriamente as rotações e translações inseridas no espaço-objeto. Por este motivo, apesar de os EOPs gerados deste ajustamento serem mais próximos do esperado, não é interessante considerá-los via de regra.

Quanto ao Ajustamento com APs, como os parâmetros de entrada inseridos são provenientes do Registro, há mais erros embutidos neste ajustamento. Isso se deve ao fato de que os EOPs influenciam diretamente na determinação dos APs; portanto, uma determinação não rígida o suficiente pode resultar numa estimativa inferior dos APs.

Tabela 1. Erros sistemáticos inseridos nas nuvens de pontos simuladas, EOP resultantes do Registro e EOPs e APs resultantes do ajustamento com APs

Parâmetros Inseridos	Estação	Translações			Rotações			Parâmetros	APs	
		x	y	z	$\kappa (^{\circ} '' '')$	$\phi (^{\circ} '' '')$	$\omega (^{\circ} '' '')$		a (mm)	
Parâmetros	1	5,000	2,000	0,000	0° 0' 30"	0° 0' 30"	40° 0' 0"	b1(^{\circ} '' '')	0° 0' 5"	
	2	2,000	5,000	0,000	0° 0' 10"	0° 0' 20"	20° 0' 0"	b2(^{\circ} '' '')	0° 0' 4"	
	3	8,000	8,000	0,000	0° 0' 12"	0° 0' 25"	10° 0' 0"	c (^{\circ} '' '')	0° 0' 3"	
Registro	Estação	Translações			Rotações			Parâmetros	APs	
		x	y	z	$\kappa (^{\circ} '' '')$	$\phi (^{\circ} '' '')$	$\omega (^{\circ} '' '')$		a (mm)	
Registro	1	5,005	2,002	0,000	0° 0' 30"	0° 0' 30"	40° 0' 0"	b1(^{\circ} '' '')	N/A	
	2	2,002	5,005	0,000	0° 0' 10"	0° 0' 20"	20° 0' 0"	b2(^{\circ} '' '')	N/A	
	3	8,003	8,004	0,000	0° 0' 12"	0° 0' 25"	10° 0' 0"	c (^{\circ} '' '')	N/A	
Ajustamento com Aps	Estação	Translações			Rotações			Parâmetros	APs	
		x	y	z	$\kappa (^{\circ} '' '')$	$\phi (^{\circ} '' '')$	$\omega (^{\circ} '' '')$		a (mm)	
Ajustamento com Aps	1	5,007	2,003	0,000	0° 0' 30"	0° 0' 30"	40° 0' 0"	b1(^{\circ} '' '')	0° 0' 1.7"	
	2	2,003	5,007	0,000	0° 0' 10"	0° 0' 20"	20° 0' 0"	b2(^{\circ} '' '')	0° 0' 04"	
	3	8,005	8,005	0,000	0° 0' 12"	0° 0' 25"	10° 0' 0"	c (^{\circ} '' '')	0° 0' 0.1"	

5. Conclusão

Como os resultados ainda são preliminares, é preciso investigar processo de ajustamento, afim de melhor explicar os APs e analisar as suas correlações. Outro aspecto é que não foram inseridos erros aleatórios neste estudo e isto pode provocar um resultado de ajustamento enviesado, já que numa situação real, estes erros acontecem comumente.

Nota-se, portanto, a necessidade de prosseguir este estudo meticolosa e sistematicamente, inserindo erros aleatórios e criando uma distribuição de pontos mais fiel a uma situação real. A introdução de novas análises estatísticas, como por exemplo, para a detecção de *outliers* e para uma validação mais eficiente dos APs.

Assim, percebe-se que, apesar de ainda estar em estudos preliminares, o algoritmo para autocalibração de um LST se mostra capaz de indicar a presença de erros

sistemáticos presentes num LST e perceber variações sutis na entrada de dados, o que reforça a necessidade de uma boa rigidez geométrica do sistema.

Referências

- Borges, P. A. F. (2017). Desenvolvimento de metodologias para análise de acurácia. dissertation, Escola Politécnica da Universidade de São paulo.
- Chan, T. O. and Lichti, D. D. (2012). Cylinder based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 39(B5):169–174.
- Chow, J., Lichti, D., and Glennie, C. (2011). Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38(5/12):121–126.
- Chow, J., Lichti, D., and Teskey, W. (2012). Accuracy assessment of the faro focus3d and leica hds6100 panoramic type terrestrial laser scanner through point-based and plane-based user self-calibration. *Proceedings of the FIG Working Week: Knowing to Manage the Territory, Protect the Environment, Evaluate the Cultural Heritage, Rome, Italy*, 610.
- Coelho, L. and Brito, J. N. (2007). *Fotogrametria digital*, volume 181. EdUERJ.
- Corrêa, S., Lima, L., Santos, A., and Medeiros, N. G. (2017). Análise comparativa de métodos pre-estabelecidos de calibração de laser scanner terrestre. *XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro - RJ*, pages 873–878.
- García-San-Miguel, D. and Lerma, J. (2013). Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 79:122–136.
- Gemael, C. (1994). *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. editora UFPR.
- Leonartovicz, I. R. (2013). Avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas: estudo de caso uhe maua. Master's thesis, Universidade Federal do Parana. Curitiba.
- Lerma, J. and García-San-Miguel, D. (2014). Self-calibration of terrestrial laser scanners: Selection of the best geometric additional parameters. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(5).
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an am–cw terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5):307–324.
- Lichti, D. D. (2010). Terrestrial laser scanner self-calibration: Correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65:93–102.
- Reshetyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Master's thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Estocolmo, Escócia.
- Vosselman, G. and Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanner*. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK.