

Localização de Robôs em Explorações Espaciais: Uma Revisão da Literatura

GABRIEL BIANCHIN DE OLIVEIRA *

*Instituto de Computação (IC) - Unicamp

E-mail: g230217@dac.unicamp.br

Resumo – A localização de robôs em explorações espaciais é essencial para o sucesso das missões. Devido a falta de sinais de localização como o GPS, diversas técnicas vêm sendo estudadas para a realização da localização de robôs em corpos celestes. Dentre as abordagens utilizadas, as mais tratadas na literatura são odometria calculada pela roda do robô, odometria visual e métodos estatísticos. Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais trabalhos do tema e os métodos propostos, com trabalhos que vão dos anos 2000 até os dias atuais. Como resultado, percebemos que existe uma tendência cronológica das abordagens, iniciando de trabalhos de odometria e odometria visual até métodos estatísticos que tratam da incerteza da localização.

Palavras-chave – Odometria, Odometria Visual, Explorações Espaciais, *Planetary Rovers*

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço da exploração espacial, surgiu a oportunidade da criação de robôs para realizar essas atividades. Estes robôs, chamados de *planetary rovers*, são fundamentais para diversas atividades envolvidas na exploração espacial, como investigações sobre as superfícies dos corpos celestes, realização de atividades com uso de materiais científicos e retorno destes dados para a Terra [1]. Os *planetary rovers* podem ser autônomos ou tripulados.

Em expedições recentes para Marte, a Agência Espacial Norte Americana (NASA) enviou alguns robôs para o planeta vermelho, como os *planetary rovers* Spirit, Opportunity e Curiosity [2]. Já para a Lua, robôs foram enviados desde o final da década de 1950, quando o *planetary rover* Luna 2 foi lançado pela União Soviética.

Porém, estimar a localização destes *planetary rovers* é uma tarefa complexa, principalmente por não existir sinais de GPS em Marte e na Lua [3]. Outro agravante é a superfície encontrada nestes corpos celestes, já que o solo marciano e o solo lunar possuem características rochosas e arenosas, ocorrido devido a impactos de asteroides, fazendo com que ocorram derrapagens.

Diversas abordagens foram propostas para solucionar o problema de localização de *planetary rovers* em ambientes fora da Terra. Este trabalho tem como intuito fazer uma revisão bibliográfica dessas abordagens.

As próximas seções encontram-se organizadas da seguinte forma: a Seção II descreve os conceitos preliminares. A Seção III apresenta as abordagens encontradas na literatura. Resultados e conclusões são apresentados na Seção IV.

II. CONCEITOS PRELIMINARES

Nesta seção são apresentados conceitos básicos utilizados nas abordagens encontradas na literatura.

A. Odometria

A odometria é um método de estimar a localização de um robô móvel a partir da variação de ângulo das rodas. Este método estima a posição do robô a partir de um ponto inicial conhecido.

O cálculo da odometria é realizado segundo a Equação 1,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}_0 + \sum_{k=1}^t \begin{bmatrix} \Delta_s \cos(\theta + \frac{\Delta_\theta}{2}) \\ \Delta_s \sin(\theta + \frac{\Delta_\theta}{2}) \\ \Delta_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

sendo $\Delta_s = \frac{R(\omega + \omega_l)}{2} \Delta_t$ onde Δ_s é a variação de espaço que o robô deslocou, $\omega = \frac{R(\omega_r - \omega_l)}{2}$ onde ω é a velocidade angular do robô e $\Delta_\theta = \omega \Delta_t$ onde Δ_θ é a variação de ângulo.

A odometria calculada através das rodas do robô possui dificuldades ao longo do tempo. Como esta técnica utiliza o cálculo da posição atual baseada na posição anterior, se em algum momento a posição estimada for incorreta, o erro irá propagar para as próximas estimativas, fazendo com que o erro cresça de forma rápida [4].

Utilizando a odometria, experimentos realizados mostraram que o erro é cerca de 5% do trajeto dirigido, porém esse erro pode ser ainda maior por conta da derrapagem dos *planetary rovers* nos terrenos dos corpos celestes [3].

Na expedição de 2004, os *planetary rovers* que exploraram Marte tiveram dificuldades em se localizar utilizando apenas os sensores que calculam a odometria [5].

B. Odometria Visual

A odometria visual utiliza sequência de imagens para estimar a posição e localização do robô. Para isso, deve-se tirar fotos em sequência do cenário e encontrar sobreposições de pontos de interesse entre o conjunto de imagens, estimando a posição e movimentação do robô. Os pontos de referência nas fotos são conhecidos como *landmarks* [6].

Inicialmente, as abordagens que utilizam odometria visual fazem a extração de características das imagens, utilizando descritores para encontrar pontos de interesse nas imagens. Alguns descritores que podem ser usados, como o FAST [7], o SIFT [8] e o método de Harris-Laplace [9].

Após a extração de características, deve-se fazer a correspondência entre os pontos de interesse das imagens. Para isso, alguns algoritmos podem ser utilizados, como o método de fluxo ótico de Lucas-Kanade [10].

A última etapa consiste na estimativa de movimentação do robô a partir do rastreamento dos pontos de interesse entre as imagens em sequência.

A realização do cálculo de odometria visual depende da câmera do robô. Quanto a isso, o robô pode ser classificado como monocular, quando o robô só possui uma câmera, ou seja, possui apenas noções 2D, stereo, quando o robô possui mais de uma câmera, possibilitando noções 3D, e omnidirecional, com visão em 180° [11].

Com a odometria visual, a localização e navegação do robô pode ser feita por terrenos mais diferenciados, aumentando o número de possíveis locais para análise científica [12].

A odometria visual possui melhores resultados em relação a odometria da roda do robô. A grande vantagem da odometria visual em relação a odometria calculada pela roda é que ela não é afetada pelo terreno, portanto, deslizamentos e derrapagens não afetam a estimativa de posição do robô. A grande desvantagem desta técnica é o alto poder computacional requerido, fazendo com que a velocidade de movimento de *rovers* que exploraram Marte caia de 124 m/h para 114 m/h [12].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentadas as abordagens encontradas na literatura.

A. Odometria

Ali et al. [13] apresentaram a metodologia utilizada para a estimativa de posição e *attitude* dos robôs *Spirit* e *Opportunity* em explorações espaciais em Marte. A metodologia utiliza odometria calculada através da roda, giroscópio, odometria visual (utilizada para verificar quando o robô escorregou ou derrapou em solo arenoso) e atualizações da *attitude*. Os resultados mostraram que a odometria calculada pela roda e os giroscópios conseguiram estimar bem a posição do robô em terrenos planos, porém em terrenos arenosos, esse método não atingiu bons resultados, sendo necessário utilizar a odometria visual.

B. Odometria Visual

Olson et al. [6] examinaram técnicas de movimentação utilizando imagens stereo para localização de robôs em médios e grandes deslocamentos. Algumas das técnicas avaliadas pelos pesquisadores foram otimização de extração de características, rejeição de *outliers* e rastreamento de características em *multi-frames*. Como resultado, os autores observaram que o sensor de orientação absoluto é necessário para navegações de longa distância, devido ao crescimento linear do erro de localização causado.

Corke et al. [3] compararam dois métodos que utilizam odometria visual em tempo real. A câmera utilizada para os experimentos foi uma câmera omnidirecional. A metodologia

utilizada foi extrair características de uma imagem e encontrar correlações com as próximas imagens. A primeira abordagem usa o método de fluxo ótico, capaz de estimar bons parâmetros da câmera e a velocidade do veículo. A segunda abordagem utiliza a técnica de *shape-from-motion*, capaz de ter uma boa estimativa de posição, porém possui um alto custo computacional.

Se et al. [14] compararam a estimativa de localização de *planetary rovers* entre os métodos LIDAR e odometria visual com o método de odometria calculada pela roda do robô. Os experimentos mostraram que a odometria calculada da roda é relativamente boa apenas para distâncias muito curtas, já que o erro da estimativa é acumulativa. Em relação a odometria calculada pela roda, os resultados obtidos pela odometria visual e pelo LIDAR foram superiores, porém foi demonstrado que a odometria visual depende da presença de características no ambiente, enquanto os resultados obtidos pelo LIDAR mostraram que este método é dependente de características 3D do ambiente, como rochas e montanhas.

Barfoot [5] demonstrou a possibilidade de *rovers* de utilizar descritores obtidos pelo algoritmo SIFT como *landmarks* para localização e mapeamento de forma eficiente. Testes foram feitos em ambientes fechados, ambientes abertos como solo arenoso e com cascalhos, revelando que a abordagem proposta possui melhores resultados que a odometria, com o erro variando entre 0,5% até 4% do caminho viajado.

Cheng et al. [15] propuseram um algoritmo de cálculo de odometria visual de imagens stereo. Para isso, utilizaram um extrator de características de cantos, fizeram o *matching* entre o par de fotos tirados, a correspondência entre as imagens anteriores as imagens analisadas e a estimativa de movimento. Os autores utilizaram o método com menor custo computacional do que os apresentados (estimativa do mínimos quadrados) com o removedor de outliers RANSAC. Alguns testes foram realizados com robôs em regiões diversas, como no Meridiani Planum, região de plana em Marte, e em crateras. Os resultados mostraram que a odometria visual consegue estimar bem os resultados, porém em terrenos planos e sem muita variação, como o Meridiani Planum, a extração de características não é feita de maneira eficaz.

Helmick et al. [4] apresentaram um algoritmo para a compensação de derrapagens de *planetary rovers*. Este algoritmo verifica a variação da posição estimada pela odometria calculada pela roda do robô com a odometria visual. Caso a diferença seja maior que o limiar estabelecido, o algoritmo corrige o cálculo da posição de modo *online*. Os resultados mostraram que a odometria visual conseguiu estimar consistentemente a posição do robô e que a abordagem de compensação de derrapagem conseguiu estimar e corrigir a posição do robô.

Bakambu et al. [16] apresentaram a performance de estimadores de posição com odometria visual no projeto *Autonomous, Intelligent, and Robust Guidance, Navigation, and Control for Planetary Rovers* (AIR-GNC). Nos cenários do AIR-GNC, haviam tarefas como escaneamento de terreno, modelamento de atividades, planejamento de caminho e rastrea-

mento. Os resultados mostraram que a odometria com correção atingiu resultados melhores que o extrator de características de imagens *stereo* MSER (*Maximally Stable Extremal Regions*), SIFT e Harris–Laplace.

C. Métodos estatísticos

Ishigami et al. [17] apresentaram um método de predição de posição de robôs em explorações espaciais utilizando o modelo de cálculo de movimento dinâmico do robô a partir das rodas, a forças de interação das rodas com o terreno e o modelo estocástico para modelar incertezas SRS (stochastic response surface method). Esse método é capaz de apresentar elipses, representando regiões possíveis que o robô pode estar localizado. Os autores compararam o modelo SRS, Monte Carlo e LHS (Latin Hypercube Sampling Monte Carlo), tendo como resultado que o SRS é melhor. Os testes realizados compararam os métodos em um movimento em linha reta, portanto não são apresentados resultados em movimentos mais bruscos, como curvas.

Ghosh et al. [2] propuseram um método baseado no ACE [18] com probabilidade para estimar os estados cinemáticos de robôs com suspensão articuladas, chamado de p-ACE. Em comparação com o ACE, o método p-ACE normaliza os dados e elimina estados cinemáticos que estão fora da distribuição normalizada. Como resultado, experimentos empíricos mostraram que o p-ACE possui melhores resultados que o ACE em terrenos muito rochosos e consegue criar uma rota mais segura para movimentação.

Hidalgo-Carrió et al. [12] apresentaram um modelo que utiliza odometria calculada da roda do *planetary rover* com processo regressor gaussiano para diminuir os erros calculados pela odometria. Além disto, os autores apresentaram uma técnica adaptativa para localização e mapeamento autônomo baseado em grafos esparsos, sendo esta solução apresentada capaz de adaptar de forma *online*.

IV. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A localização de *planetary rovers* é fundamental para o sucesso de expedições espaciais. Devido a falta de sinais de GPS, diversas técnicas vem sendo estudadas para suprir a dificuldade de localização destes robôs. As principais técnicas lidam com odometria calculada através das rodas dos robôs, odometria visual calculada pelas câmeras do robôs e métodos estatísticos para lidar com a incerteza da posição calculada.

Em relação a evolução das técnicas utilizadas, é possível visualizar que seguiu uma tendência, iniciando na odometria calculada pela roda nas explorações em Marte dos robôs *Spirit* e *Opportunity* no início do século XXI e com outros trabalhos de odometria visual, até técnicas estatísticas que poderão ser utilizadas nas próximas explorações. Uma tabela cronológica com os trabalhos citados neste artigo pode ser vista na Tabela I.

Em relação às abordagens, foi possível perceber que tanto a odometria visual quanto a utilização de métodos estatísticos é superior ao método de odometria calculada pelas rodas do robô, principalmente por conta da derrapagem em terrenos arenosos. A maior vantagem da odometria calculada pelas

Trabalho	Ano	Método
Olson et al. [6]	2000	odometria visual
Corke et al. [3]	2004	odometria visual
Se et al. [14]	2004	odometria visual
Ali et al. [13]	2005	odometria
Barfoot [5]	2005	odometria visual
Cheng et al. [15]	2005	odometria visual
Helmick et al. [4]	2006	odometria visual
Ishigami et al. [17]	2010	método estatístico
Bakambu et al. [16]	2012	odometria visual
Ghosh et al. [2]	2018	método estatístico
Hidalgo-Carrió et al. [12]	2018	método estatístico

Tabela I

TABELA CRONOLÓGICA DOS TRABALHOS CITADOS.

rodas do robô em relação aos outros métodos é o custo computacional.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Chhaniyara, C. Brunskill, B. Yeomans, M. Matthews, C. Saaj, S. Ransom, and L. Richter, "Terrain trafficability analysis and soil mechanical property identification for planetary rovers: A survey," *Journal of Terramechanics*, vol. 49, no. 2, pp. 115–128, 2012. 1
- [2] O. Lamarre and J. Kelly, "Overcoming the challenges of solar rover autonomy: Enabling long-duration planetary navigation," *arXiv preprint arXiv:1805.05451*, 2018. 1, 3
- [3] P. Corke, D. Strelow, and S. Singh, "Omnidirectional visual odometry for a planetary rover," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No. 04CH37566), vol. 4. IEEE, 2004, pp. 4007–4012. 1, 2, 3
- [4] D. M. Helmick, S. I. Roumeliotis, Y. Cheng, D. S. Clouse, M. Bajracharya, and L. H. Matthies, "Slip-compensated path following for planetary exploration rovers," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 11, pp. 1257–1280, 2006. 1, 2, 3
- [5] T. D. Barfoot, "Online visual motion estimation using fastslam with sift features," in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005, pp. 579–585. 1, 2, 3
- [6] C. F. Olson, L. H. Matthies, H. Schoppers, and M. W. Maimone, "Robust stereo ego-motion for long distance navigation," in *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000* (Cat. No. PR00662), vol. 2. IEEE, 2000, pp. 453–458. 1, 2, 3
- [7] E. Rosten and T. Drummond, "Machine learning for high-speed corner detection," in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Springer, 2006, pp. 430–443. 1
- [8] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004. 1
- [9] C. G. Harris, M. Stephens et al., "A combined corner and edge detector," in *Alvey vision conference*, vol. 15, no. 50. Citeseer, 1988, pp. 10–5244. 1
- [10] B. D. Lucas, T. Kanade et al., "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," 1981. 2
- [11] D. Scaramuzza and F. Fraundorfer, "Visual odometry [tutorial]," *IEEE robotics & automation magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 80–92, 2011. 2
- [12] J. Hidalgo-Carrió, P. Poulakis, and F. Kirchner, "Adaptive localization and mapping with application to planetary rovers," *Journal of Field Robotics*, vol. 35, no. 6, pp. 961–987, 2018. 2, 3
- [13] K. S. Ali, C. A. Vanelli, J. J. Biesiadecki, M. W. Maimone, Y. Cheng, A. M. San Martin, and J. W. Alexander, "Attitude and position estimation on the mars exploration rovers," in *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1. IEEE, 2005, pp. 20–27. 2, 3
- [14] S. Se, H.-K. Ng, P. Jasiobedzki, and T.-J. Moyung, "Vision based modeling and localization for planetary exploration rovers," in *Proceedings of International Astronautical Congress*, 2004, pp. 434–440. 2, 3
- [15] Y. Cheng, M. Maimone, and L. Matthies, "Visual odometry on the mars exploration rovers," in *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1. IEEE, 2005, pp. 903–910. 2, 3

- [16] J. N. Bakambu, C. Langley, G. Pushpanathan, W. J. MacLean, R. Mukherji, and E. Dupuis, "Field trial results of planetary rover visual motion estimation in mars analogue terrain," *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no. 3, pp. 413–425, 2012. [2](#), [3](#)
- [17] G. Ishigami, G. Kewlani, and K. Iagnemma, "Statistical mobility prediction for planetary surface exploration rovers in uncertain terrain," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010, pp. 588–593. [3](#)
- [18] K. Otsu, G. Matheron, S. Ghosh, O. Toupet, and M. Ono, "Fast approximate clearance evaluation for rovers with articulated suspension systems," *Journal of Field Robotics*, 2019. [3](#)