

MONITORAMENTO DA INFRAESTRUTURA VIÁRIA BASEADO EM SENSORES DE BAIXO CUSTO: APLICAÇÃO FERROVIÁRIA

Rafael Henrique de Oliveira
Flávio Vaz de Almeida Filho
Edvaldo Simões da Fonseca Junior
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

A pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da infraestrutura de transporte baseado no uso coletivo de sensores de baixo custo embarcados em veículos em operação, compondo ferramenta de menor custo e maior produtividade em relação às técnicas tradicionais. A princípio, cada unidade sensora será composta por microcomputador, módulo de sensores (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro), módulo *Global Positioning System* (GPS), alimentação de energia e unidade de armazenamento. A baixa qualidade individual dos sensores de baixo custo seria superada, nesta proposta, pelo seu uso coletivo, isto é, embarque de determinado número de unidades sensores em um mesmo veículo e integração desses dados para geração de parâmetros associados à qualidade da via. A tese pretende testar a viabilidade desse conceito no monitoramento das condições da superestrutura ferroviária, compreendendo o levantamento de parâmetros da geometria viária, da condição dos trilhos e da rigidez da via e identificando quais desses parâmetros seriam efetivamente monitoráveis pelo sistema proposto. Testes iniciais para apenas um parâmetro da via (rigidez da via) para análise identificaram limitações do uso individual desses sensores na diferenciação de trechos de diferentes rigidezes.

1. INTRODUÇÃO

O uso de veículos especialmente equipados no levantamento das condições da infraestrutura viária (em sentido amplo, considerando os diferentes modos de transporte e compreendendo traçado, seção transversal, pavimento, sinalização, etc.) é atividade corrente (Pita, 2006; Bernucci, 2012). No domínio dos transportes sobre trilhos, considerando o monitoramento da superestrutura ferroviária, os carros-controlê atuais empregam sensores sem contato mecânico, como sensores inerciais ou óticos embarcados no carro e sem contato com a via. Para levantamento da geometria da via permanente ferroviária, utilizam majoritariamente triangulação *laser*, sensoriamento ótico que consiste na varredura do feixe ao longo da seção transversal do trilho e no registro da luz refletida por câmeras posicionadas sobre cada trilho. Para defeitos internos aos trilhos, os carros-controlê utilizam inspeção baseada em sondagem ultrassônica (Pita, 2006). Outra possibilidade presente é o uso dos chamados *Unattended Geometry Measuring Systems* (UGMS), módulos instaláveis no truque ferroviário e que compreendem o uso de sensores inerciais combinado com o levantamento por triangulação *laser* (Network Rail, 2007).

As principais limitações associadas aos carros de inspeção especialmente desenvolvidos para esse fim são os elevados custos de aquisição e manutenção desses veículos e a consequente menor cobertura espaço-temporal (Bridgelall, 2014). Os módulos UGMS representam alternativa menos custosa e aplicável a trens em serviço, resultando em maior frequência na coleta de dados da via. Com a introdução dos sistemas micro eletromecânicos (*micro-electro-mechanical systems*, MEMS), sensores inerciais tem se tornado cada vez mais baratos, menores e energeticamente eficientes, transformando-se em possíveis alternativas ainda menos custosas que os módulos UGMS e de maior escalabilidade no monitoramento da infraestrutura ferroviária (Weston *et al.*, 2015).

Assim, a presente pesquisa pretende estudar sistema de monitoramento coletivo da infraestrutura viário baseado em sensores de baixo custo. Para compensação da baixa qualidade individual dos sensores utilizados, estuda-se a viabilidade do uso coletivo desses

sensores, compreendendo embarque de certo número (a ser determinado) de nós sensores de baixo custo em um mesmo veículo. Pretende-se realizar aplicação desse conceito ao monitoramento das condições da superestrutura ferroviária, compreendendo a geometria da via (bitola, alinhamento, nivelamentos, torção, empeno), a condição dos trilhos (corrugação, trincas e estado das juntas) e da rigidez da via (condições do lastro ou laje).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Objetivando redução de custos e aumento de produtividade no monitoramento da via permanente ferroviária, pesquisas têm buscado alternativas baseadas em sensores a serem embarcados em composições em operação comercial. A seguir, são listados alguns dos trabalhos identificados na literatura que seguem esse conceito no monitoramento de parâmetros da geometria, das condições dos trilhos e da rigidez da via.

Mori *et al.* (2010) apresentam o desenvolvimento de um sistema destinado à identificação em tempo real de irregularidades na superestrutura ferroviária. A técnica emprega captação do ruído de cabine de veículo em operação integrada aos registros de acelerômetro e giroscópio (equipamentos de custo e qualidade de baixos para intermediários, de uso industrial) na identificação da corrugação dos trilhos e de irregularidades na geometria da via. Testes realizados em linha ferroviária local, de baixa velocidade, mostraram a viabilidade do sistema e sua aptidão na identificação das irregularidades. Lee *et al.* (2012) descrevem um método de estimativa das irregularidades da via a partir de acelerômetro (nível industrial) instalado no truque e na caixa de eixo de trens de alta velocidade. A abordagem utilizou, de forma bem-sucedida, filtro de Kalman para estimar os deslocamentos verticais ou laterais associados às acelerações medidas e filtros passa banda para separar essas medições em termos do comprimento de onda de irregularidade associado.

Molodova *et al.* (2014) discutem sistema similar, empregando medições de aceleração vertical (acelerômetro industrial) da caixa de eixo na identificação de trincas e fraturas nos trilhos. A partir da redução de ruídos e da detecção de picos, é possível definir os limiares de aceleração vertical associados a um defeito pontual e sua magnitude. Os testes conduzidos mostraram taxas de detecção correta da ordem de 78% com 15% de alarmes falsos. Em trabalho posterior (Li *et al.*, 2015), o mesmo grupo de pesquisas discute o emprego adicional de acelerômetros longitudinais e de técnicas de processamento de sinal para isolar vibrações associadas aos defeitos das rodas. Os novos testes resultaram em taxa de detecção correta de 85%.

Weston *et al.* (2015) realizam trabalho de revisão da literatura no monitoramento das condições da geometria da via permanente a partir de veículos em operação comercial. Os autores concluíram que as pesquisas levantadas privilegiaram o embarque do acelerômetro na caixa de eixo ou sobre o truque ferroviário, enquanto o posicionamento dos sensores no carro ferroviário representa desafio no tratamento dos dados associado aos sistemas de suspensão. Além disso, os autores afirmam que sensores inerciais de baixo custo (destinados ao consumidor final, similares àqueles de *smartphones*) não possuem qualidade suficiente para medição da qualidade da geometria, sendo majoritariamente usados sensores de uso industrial.

Lederman *et al.* (2017) também empregam acelerômetros de uso industrial para a identificação das condições da via. Em vez de identificação de picos na aceleração vertical, verificou-se que métodos baseados na energia do sinal de resposta seriam mais sensíveis a modificações na via, estando aptos à detecção de trechos onde houve renovação de trilhos ou

readequação do lastro (isto é, trechos de via com diferentes rigidezes).

Considerando o estado da arte nesse campo de pesquisa, o presente trabalho estuda a superação de duas limitações: a) uso de sensores fixados ao corpo do veículo, lidando com do desafio representado pelo sistema de suspensão; e b) uso de sensores de baixo custo, destinados ao consumidor final (similares àqueles de *smartphones*) e de qualidade inferior em relação aos sensores industriais majoritariamente usados na literatura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira questão do sistema proposto é a composição dos nós sensores. Cada unidade sensora a ser embarcada nos veículos em operação será composta por: *i*) microcomputador *Raspberry Zero W*, com funcionalidades de comunicação sem fio; *ii*) módulo sensor composto por acelerômetro, giroscópio, magnetômetro e barômetro; *iii*) alimentação de energia (bateria simples ou bateria com carregador solar); *iv*) módulo *Global Positioning System* (GPS); e *v*) unidade de armazenamento (cartão SD).

A segunda questão relevante para composição do sistema é a discussão dos métodos para integração dos dados e geração de parâmetros associados à qualidade viária de um dado trecho em um dado momento, tendo em conta a influência do sistema de suspensão nas medições. Essa atividade se daria em três passos, usualmente utilizando técnicas como filtro de Kalman estendido ou filtro complementar (Titterton e Weston, 2004; Park e Hong, 2011):

- Integração de sensores de diferentes naturezas: fusão dos dados de acelerômetro, giroscópio e magnetômetro de uma mesma unidade sensora.
- Integração de dados de diferentes unidades sensoras. A depender da localização de cada no sensor no veículo, a resposta obtida por cada unidade sensora deve estar correlacionada com as demais obtidas no mesmo veículo por outras unidades.
- Integração de dados de passagens sucessivas por um mesmo trecho, em um horizonte de tempo no qual não ocorra degradação significativa do pavimento.

Os resultados gerados pelo método serão avaliados segundo precisão (dispersão das diferentes medidas individuais em relação ao valor médio do conjunto) e exatidão (comparação com dados coletados por técnica mais acurada) para cada parâmetro da via. A partir dessa análise, pretende-se definir quais características da via seriam efetivamente monitoráveis por meio desse sistema.

4. RESULTADOS INICIAIS

Para avaliação exploratória dos limites do uso individual de sensores de baixo, realizou-se o levantamento de dados ao longo de nove viagens pela linha 13 da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. Pretendeu-se distinguir, a partir do tratamento dos dados de aceleração vertical, distinguir o trecho em lastro (primeiros 2,6 km a partir da estação Eng. Goulart) do trecho em laje, uma vez que a diferença de rigidez dessas configurações traduz-se em diferentes. Para coleta dos dados, utilizou-se aparelho *smartphone* fixado na lateral da composição ferroviária voltada para Oeste. Para registro dos dados, adotou-se o aplicativo *AndroSensor* e frequência de gravação de 100 Hz para os dados do acelerômetro e 1 Hz para aqueles do receptor GNSS, taxas máximas para ambos.

Para análise da vibração vertical, empregou-se três técnicas de análise dos dados: análise da

média móvel em aceleração vertical, análise do desvio padrão móvel em aceleração vertical e análise do espectrograma (por transformada de Fourier de curto termo) da aceleração vertical pré-tratada por média móvel. Nessas análises, o uso de média ou desvio móvel busca reduzir os ruídos dos sinais dos sensores. Não foi possível, a partir das abordagens propostas, realizar a distinção entre os trechos de diferentes rigidezes de via.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica indica a utilização bem-sucedida de sensores inerciais de uso industrial em aplicações de monitoramento da qualidade da superestrutura ferroviária. Como inovação, a pesquisa proposta buscará utilizar sensores de custo ainda menor (destinados ao consumidor final) fixados no corpo de veículo em operação. Para tanto, estudar-se-á um sistema de monitoramento das vias baseado nesses sensores de menor custo em dois aspectos: a) composição física do sistema, compreendendo quantidade e localização dos sensores em um veículo em operação; e b) ferramentas de integração dos sensores para geração de parâmetros associados à qualidade viária. Em testes preliminares, a pesquisa confirmou as limitações de sensores de baixo custo utilizados de forma individual para distinguir a rigidez da via. Os próximos passos da pesquisa buscarão testar a hipótese de que o uso de mais de uma unidade sensora embarcada, chamado neste trabalho de monitoramento coletivo, oferecerá melhores resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernucci, L. B., Augusto, J., Ceratti, P., Barbosa, J., Laura, S., Goretti, M., e Motta, D. (2006) Pavimentação Asfáltica. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro.
- Bridgelall, R. (2014) Connected Vehicle Approach for Pavement Roughness Evaluation. *Journal of Infrastructure Systems*, 20(1), 04013001.
- Lederman, G., Chen, S., Garrett, J. H., Kovačević, J., Noh, H. Y., e Bielak, J. (2017) A data fusion approach for track monitoring from multiple in-service trains. *Mech. Systems and Signal Processing*, 95, 363–379.
- Lee, J. S., Choi, S., Kim, S. S., Park, C., e Kim, Y. G. (2012) A mixed filtering approach for track condition monitoring using accelerometers on the axle box and bogie. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 61(3), 749–758.
- Li, Z., Molodova, M., Nunez, A., e Dollevoet, R. (2015) Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62, 4385–4397.
- Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., e Dollevoet, R. (2014) Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(1), 1980–1990.
- Mori, H., Tsunashima, H., Kojima, T., Matsumoto, A., e Mizuma, T. (2010) Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle. *Journal of Mech. Systems for Transp. and Logistics*, 3(1), 154–165.
- Network Rail. (2007) Train Infrastructure Interface Specification (TIIS) - IEP-TEHC-REQ-36. Network Rail, Ed, Issue 03. Network Rail, London, UK.
- Park, S., e Hong, S. K. (2011) Angular rate estimation using a distributed set of accelerometers. *Sensors*, 11(11), 10444–10457.
- Pita, A. L. (2006) Infraestructuras Ferroviarias. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Titterton, D., e Weston, J. L. (2004) Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd Edition. 594.
- Weston, P., Roberts, C., Yeo, G., e Stewart, E. (2015) Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 53(7), 1063–1091.

Rafael Henrique de Oliveira (rafa.oliveira@usp.br)

Flávio Vaz de Almeida Filho (flavio vaz@usp.br)

Edvaldo Simões da Fonseca Junior (edvaldoj@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, 83 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-070