



# Encoder virtual: um odômetro visual bidimensional para END

## Virtual encoder: a two-dimension visual odometer for NDT

Thiago Estrela Kalid<sup>1</sup>,      Everton Trento Jr<sup>2</sup>,      Tatiana A. Prado<sup>3</sup>,  
Thiago A. R. Passarin<sup>4</sup>

### RESUMO

A informação de um odômetro é uma importante característica em ensaios não destrutivos (END) em que há deslocamento mecânico do transdutor. Soluções comerciais de *encoders* provêm ao sistema de aquisição de END uma estimativa suficientemente exata para ser agregada a um sistema de odometria, porém usualmente restrita a uma dimensão. Apesar existirem arranjos envolvendo múltiplos *encoders* que estimem deslocamentos em 2-D ou 3-D, esses são complexos. Nós propomos um sistema de odometria 2-D baseado em processamento de imagem. Uma câmera captura continuamente imagens da superfície do objeto sob inspeção, as quais são processadas por um algoritmo que estima deslocamentos entre pares de imagens consecutivas. Há uma unidade inercial que captura os dados de orientação espacial da câmera, que posteriormente permitirão uma reconstrução 3-D da trajetória. O sistema proposto é também capaz de fornecer ao sistema de aquisição END uma estimativa em tempo-real do deslocamento, que será interpretada como proveniente de um conjunto de *encoders* de um eixo (1-D)—deste fato deriva-se o nome “encoder virtual”. Nós demonstramos sua aplicabilidade em dois tipos de cenários comuns à área de END: por contato e imersão. Os resultados mostram que o conceito é promissor, apesar de baseado em princípios simples e de fácil implementação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaios não destrutivos; Estimção de deslocamento; Odometria visual.

### ABSTRACT

Odometer information is an important feature of NDT systems for inspection procedures that involve mechanical scanning. Commercial encoders provide NDT systems with accurate real-time displacement information that can be integrated to obtain odometry, however typically limited to a single axis. Although composite schemes with more than one encoder can be built to provide 2-D or 3-D spatial information, they are mechanically intricate and lack flexibility and ease of use. We propose a 2-D position-tracking solution that is based on image processing. A camera continuously captures images of the surface of the inspected object, which are fed to an algorithm that detects 2-D displacement between each pair of consecutive images. Additionally, the orientation quaternions provided by an Inertial Measurement Unit are stored, allowing for posterior 3-D path reconstruction. Besides logging position and orientation histories, the device also provides real-time displacement information to the NDT system, where it is perceived as a set of single-axis encoders, thus termed “the virtual encoder”. We demonstrate the applicability of the device to both contact and immersion ultrasonic inspections. The results show that the concept is promising, despite being based on simple principles and relatively easy to implement.

**KEYWORDS:** Nondestructive testing; Motion estimation; Visual odometry.

<sup>1</sup> Bolsista da PETROBRÁS/CENPES via projeto AUSPEX. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: thiagokalid@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7094341848149956.

<sup>2</sup> Bolsista da PETROBRÁS/CENPES via projeto AUSPEX. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: evertonjunior@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8125264101828725.

<sup>3</sup> Bolsista da PETROBRÁS/CENPES via projeto AUSPEX. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: tatianaprado@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8963337882758245.

<sup>4</sup> Docente no Departamento de Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: passarin@professores.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1366903848418887.

## INTRODUÇÃO

Muitas rotinas de ensaios não destrutivos (END) envolvem a varredura mecânica do transdutor ao longo do ensaio. Um exemplo disto é o imageamento por ultrassom (US) de regiões maiores que a largura da abertura ativa do transdutor. O processo de combinar de múltiplas imagens para formar uma maior—em inglês *image stitching*—é fundamental para representar de maneira fidedigna o objeto sob inspeção, e necessita do conhecimento da trajetória feita pelo transdutor durante o ensaio. Para cumprir esta tarefa, *encoders* de roda são usados, caso a varredura limite-se a uma dimensão. Para varreduras bidimensionais (2-D), o uso de *encoders* de roda implica em sistemas muito grandes e complexos (por exemplo o Zetec NDT Sweeper™)

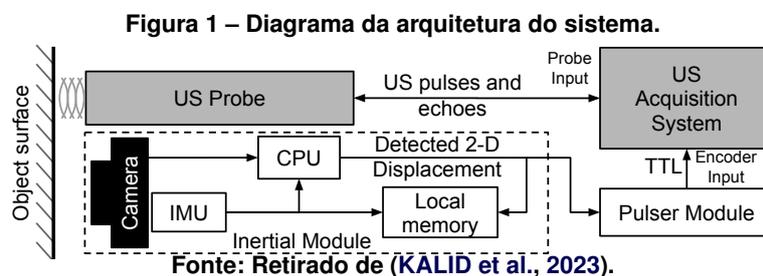
O uso de câmeras apontadas para o chão como sensor de um sistema de odometria 2-D já foi demonstrado como uma solução simples e versátil (BIREM; KLEIHORST; EL-GHOUTI, 2018; NOURANI-VATANI; BORGES, 2011). Esses sistemas citados estimam o deslocamento global por meio da comparação entre pares de *frames* usando métodos de correlação de fase (TONG et al., 2019). Pelo fato desta família de métodos apenas considerar a fase das imagens no cálculo do deslocamento, é mais robusta a ruído e corrupção de dados (TONG et al., 2019).

Iremos aplicar o conceito do uso de câmeras apontadas para o chão como parte de um sistema de odometria 2-D para END. A aplicação desejada é a inspeção de tubulações de aço, onde deseja-se a informação de deslocamento axial e longitudinal ao longo do ensaio. Além disso, o fato do objeto sob inspeção ser curvo nos motivou a utilizar uma Unidade de Medição Inercial (IMU) agregada à solução final, possibilitando uma reconstrução 3-D da trajetória.

## SOLUÇÃO PROPOSTA

### ESTRUTURA DO SISTEMA

A arquitetura do sistema e sua integração com o sistema de ultrassom estão ambos resumidos na Figura 1.



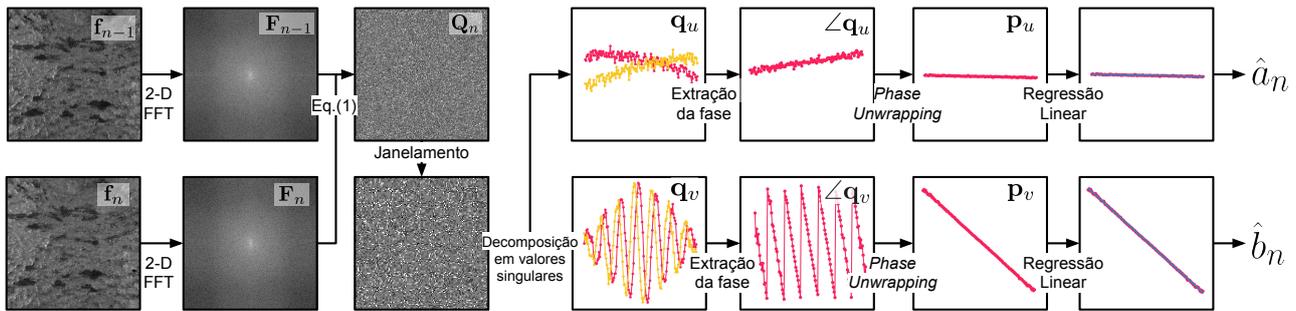
Primeiramente, a câmera captura uma foto da superfície e fornece esta para a *Central Processing Unit* (CPU). No instante  $n$ , a CPU realiza a correlação de fase entre os quadros  $n - 1$  e  $n$ , estimando o  $n$ -ésimo deslocamento 2-D. Esta estimativa é enviada para um módulo pulsador através de uma conexão *Ethernet* e armazenada na memória local. Em paralelo, a orientação do módulo inercial no instante de tempo  $n$  é obtida pela IMU e também armazenada em disco. Após a recepção, o módulo pulsador irá emitir pulsos do tipo *Transistor-Transistor Logic* (TTL) que irá emular

a mesma saída que se obteria de um odômetro mecânico para um mesmo deslocamento 2-D. O sistema de aquisição de ultrassom irá receber os pulsos TTL por uma entrada dedicada à odômetros; interpreta-los como se tivessem sido gerados por um *encoder* de roda, fixado mecanicamente ao transdutor; e por fim excitará o transdutor conforme as configurações definidas pelo usuário. Nosso sistema de estimação de deslocamento funciona em malha aberta.

### O ALGORITMO DE CORRELAÇÃO DE FASE

Nossa implementação do algoritmo de estimação de deslocamento baseia-se na solução proposta por Hoge (2003). Esta família de métodos (domínio da frequência) superam substancialmente os métodos correlação de fase clássicos (domínio do tempo) em termos de exatidão e robustez à ruído (TONG et al., 2019). O passo-a-passo do algoritmo está resumido na Figura 2.

**Figura 2 – Passo-a-passo da estimação de deslocamento 2-D ( $\hat{a}_n, \hat{b}_n$ ) a partir de dois *frames*  $f_{n-1}$  e  $f_n$ . O janelamento no domínio do tempo é aplicado, porém não está explicitamente representado nas imagens.**



Fonte: Adaptado de (KALID et al., 2023).

Sejam  $f_{n-1}(x,y)$  e  $f_n(x,y)$  dois *frames* consecutivos capturados por uma câmera,  $F_{n-1} = F_{n-1}(u,v)$  e  $F_n = F_n(u,v)$  são suas respectivas transformadas de Fourier. Assumindo que  $f_n$  é a versão deslocada de  $f_{n-1}$ , e  $f_n(x,y) = f_{n-1}(x - a, y - b)$ , onde  $a$  e  $b$  é o deslocamento horizontal e vertical medido em número de *pixels*, o deslocamento 2-D entre esses dois *frames* consecutivos pode ser estimado. Essas suposições implicam que  $f_n = f_{n-1} * \delta(x - a, y - b)$ , onde  $*$  é a convolução 2-D e  $\delta(x,y)$  é o Delta de Dirac. Então, o espectro a correlação de fase  $Q_n$  é definido como

$$Q(u,v) = \mathcal{F} \{ \delta(x - a_n, y - b_n) \} = \frac{F_{n-1} \odot F_n^*}{|F_{n-1} \odot F_n^*|} = \exp \{ -j(ua_n + vb_n) \} \quad (1)$$

onde  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  denota-se como a transformada de Fourier (TF) 2-D,  $F_n = F_n(u,v) = \mathcal{F}\{f_n(x,y)\}$  é o espectro de Fourier de  $f_n$ ,  $F_n^*$  é o complexo conjugado de  $F_n$ , e  $\odot$  é o produto de Hadamard (elemento a elemento). O método de identificação em subespaço toma vantagem do fato da exponencial complexa denotada na Equação (1) poder ser decomposta como

$$\exp \{ -j(ua_n + vb_n) \} = q_u(u,v)q_v(u,v) = \exp \{ -jua_n \} \exp \{ -jvb_n \}, \quad (2)$$

onde  $q_u(u,v) = \exp \{ -jua \}$  varia unicamente na direção de  $u$ , e  $q_v(u,v) = \exp \{ -jvb \}$  na direção de  $v$ . Isso significa que  $Q_n$  é de posto unitário. Agora definimos  $\mathbf{Q}_n \in \mathbb{C}^{M \times N}$  como uma representação matricial de  $Q_n$ , com  $M$  e  $N$  sendo o número de linhas e colunas. Desta forma,  $\mathbf{Q}_n$  é uma matriz



também de posto unitário e poderá ser decomposta como

$$\mathbf{Q}_n = \mathbf{q}_u \mathbf{q}_v^H, \quad (3)$$

onde  $\mathbf{q}_u \in \mathbb{C}^M$  e  $\mathbf{q}_v \in \mathbb{C}^N$  são vetores-coluna correspondentes a  $q_u(u,v)$  e  $q_v(u,v)$ , e  $\mathbf{q}_v^H$  é o transposto Hermitiano de  $\mathbf{q}_v$ . Para um  $\mathbf{Q}_n$  arbitrário obtido a partir de dados ruidosos e corrompidos,  $\mathbf{q}_u$  e  $\mathbf{q}_v$  são definidos a partir do teorema de Eckart-Young e podem, portanto, serem obtidos via decomposição em valores singulares, ou *Singular Values Decomposition* (SVD), de  $\mathbf{Q}_n$  seguidos de uma aproximação de posto unitário (HOGE, 2003). A informação dos deslocamentos  $a$  e  $b$  estão contidos na fase das exponenciais complexas de  $\mathbf{q}_u$  e  $\mathbf{q}_v$ . Nós calculamos a fase usando o operador  $\angle$  para cada amostra:

$$\mathbf{p}_u = \text{unwrap}(\angle \mathbf{q}_u), \quad (4a)$$

$$\mathbf{p}_v = \text{unwrap}(\angle \mathbf{q}_v), \quad (4b)$$

A função intitulada  $\text{unwrap}(\cdot)$  aplica a operação de *phase unwrapping*, necessária para estimar-se corretamente  $\angle \mathbf{q}_u$  e  $\angle \mathbf{q}_v$ , inicialmente restritos ao intervalo  $[-\pi, \pi)$  (HOGE, 2003). Após realizar-se o *phase unwrapping*, o resultado de  $\mathbf{p}_u$  e  $\mathbf{p}_v$  estará distribuído próximos a uma reta, cuja constante angular será proporcional ao deslocamento  $a$  e  $b$  que deseja-se estimar. Desta forma, a tarefa de estimar  $\hat{a}_n$  e  $\hat{b}_n$  se resumirá a de estimar a inclinação desta reta via regressão linear. Antes da Transformada Rápida de Fourier (FFT) 2-D, os *frames* passam por um janelamento no domínio do espaço para diminuir os *edging effects*. Também é aplicado um janelamento de  $\mathbf{Q}_n$  antes da SVD para eliminar as componentes de alta frequência que tendem ser ruidosas (HOGE, 2003).

## TRAJETÓRIA 3-D

No  $n$ -ésimo frame, a posição 3-D (relativa à posição inicial)  $\mathbf{r}_n$  é calculada como

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{r}_{n-1} + \mathbf{d}_n, \quad (5)$$

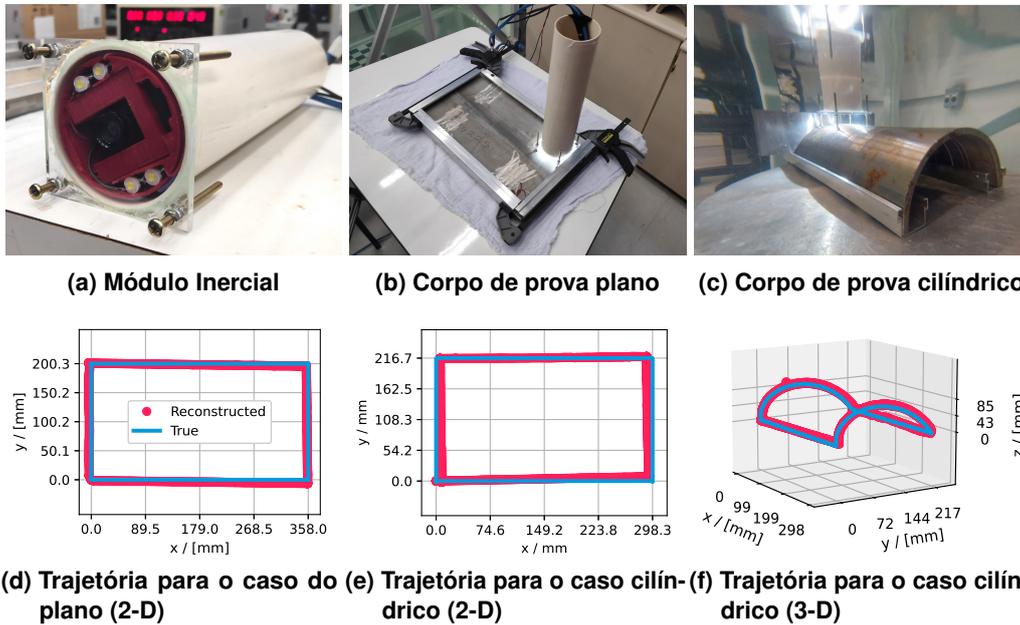
onde  $\mathbf{d}_n$  é a projeção 3-D dos deslocamentos 2-D  $[\hat{a}_n, \hat{b}_n]^T$ , obtida a partir da informação de orientação espacial obtida pela IMU na forma da quatérnions.

## EXPERIMENTOS E RESULTADOS

O Módulo Inercial foi colocado em um encapsulamento selado com uma frente de acrílico para realização dos experimentos (Figura 3a). O conjunto inteiro é apoiado na superfície por parafusos ajustáveis, para que a distância entre a câmera e a superfície possa ser ajustada, obtendo um foco ótimo. Associado à câmera usa-se uma lente macro. Um *Raspberry Pi 4 single board computer* (SBC) foi usado para obter as estimativas de deslocamento e transmiti-las para o módulo pulsador via Ethernet. O modelo da IMU e câmera são BNO055 e *Raspberry Pi Noir V2*, respectivamente.

Foram usadas molduras de alumínio para restringir o movimento nos ensaios, onde a movimentação realizou-se sobre dois tipos de corpos de prova: um com formato plano e outro cilíndrico.

**Figura 3 – Resumo dos testes propostos e suas respectivas trajetórias estimada.**



Fonte: Adaptado de (KALID et al., 2023).

O plano permitia um deslocamento de 358,0 mm por 200,3 mm na direção horizontal e vertical respectivamente (Figura 3b). O cilíndrico permitia deslocamentos de 298,3 mm e 216,7 mm na direção longitudinal e circunferencial (Figura 3c).

Para cada formato de corpo de prova, dois tipos de testes foram realizados: o primeiro era um caminho fechado seguindo os limites da moldura (intitulado *Closed-loop*), já o segundo era um caminho apenas de ida ao longo de uma das dimensões da moldura (intitulado *Single-X* ou *Single-Y* dependendo do eixo em que o deslocamento se desenvolveu). Todos os experimentos foram feitos em um ambiente seco (representando um ensaio por ultrassom por contato) e submerso (representando o ensaio por ultrassom por imersão).

O deslocamento acumulado em geral foi mais exato para os ensaios a seco do que os submersos (Tabela 1). Esse padrão pode estar associado a: menor distorção na imagem, menor número de partículas de suspensão, iluminação mais homogênea da cena e melhor manobrabilidade devido à maior atrito entre os parafusos de apoio e o corpo de prova. O erro máximo foi de 12,2 mm ou 2,8 % da distância deslocada total.

**Tabela 1 – Deslocamento acumulado em milímetros associados à trajetória 2-D estimada pelo encoder virtual**

Tipo de teste	Eixo	Planar			Cilíndrico		
		Real	Contato	Imersão	Real	Contato	Imersão
Single-x	x	358,0	358,9	357,8	298,3	299,4	293,0
	y	0,0	-4,7	-7,1	0,0	0,4	-8,4
Single-y	x	0,0	-2,6	-2,5	0,0	1,6	-0,3
	y	200,3	200,7	200,6	216,7	216,5	210,5
Closed loop	x	0,0	-3,4	-3,8	0,0	-1,6	8,2
	y	0,0	7,2	5,5	0,0	5,6	12,2

Fonte: Adaptado de (KALID et al., 2023).



## CONCLUSÕES

Um sistema de odometria visual para ensaios não destrutivos foi proposto e demonstrado funcional para ambientes secos e submersos. O protótipo foi capaz de fornecer estimativas em tempo real de deslocamentos 2-D para o sistema de ultrassom. Além disso, agregando informações da IMU foi também possível reconstruir uma trajetória 3-D cilíndrica. O sistema apresentou um erro máximo de 2,8 %, o que indica que a solução proposta é efetiva e confiável como sistema de odometria 2-D para ensaios por ultrassom.

## Agradecimentos

Agradeço às instituições de fomento à pesquisa pelo apoio financeiro: PETROBRAS/CENPES e Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

BIREM, Merwan; KLEIHORST, Richard; EL-GHOUTI, Norddin. Visual odometry based on the Fourier transform using a monocular ground-facing camera. **Journal of Real-Time Image Processing**, Springer Verlag, v. 14, n. 3, p. 637–646, mar. 2018. ISSN 18618200. DOI:

[10.1007/S11554-017-0706-3/METRICS](https://doi.org/10.1007/S11554-017-0706-3/METRICS). Disponível em: [↗](#).

HOGUE, William Scott. A subspace identification extension to the phase correlation method. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 22, n. 2, p. 277–280, fev. 2003. ISSN 02780062. DOI: [10.1109/TMI.2002.808359](https://doi.org/10.1109/TMI.2002.808359).

KALID, Thiago E. et al. Virtual encoder: a two-dimension visual odometer for NDT. **e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 28, n. 08, ago. 2023. ISSN 2941-4989. DOI: [10.58286/28119](https://doi.org/10.58286/28119). Disponível em: [↗](#).

NOURANI-VATANI, Navid; BORGES, Paulo Vinicius Koerich. Correlation-based visual odometry for ground vehicles. **Journal of Field Robotics**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 28, n. 5, p. 742–768, set. 2011. ISSN 1556-4967. DOI: [10.1002/ROB.20407](https://doi.org/10.1002/ROB.20407). Disponível em: [↗](#).

TONG, Xiaohua et al. Image Registration with Fourier-Based Image Correlation: A Comprehensive Review of Developments and Applications. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Institute of Electrical e Electronics Engineers, v. 12, n. 10, p. 4062–4081, out. 2019. ISSN 21511535. DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2937690](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2937690).