

Sistema de medição de deslocamentos com recurso a veículos aéreos não tripulados

R. Cabral¹, D. Ribeiro², R. Santos², A. Mourão³, J. Correia³, R. Calçada³

¹ Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal
rafi.cabral@gmail.com

² CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal
drr@isep.ipp.pt, rps@isep.ipp.pt

³ CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
amourao@fe.up.pt, jacorreia@fe.up.pt, ruiabc@fe.up.pt

Resumo. Este artigo descreve uma metodologia inovadora para estimar deslocamentos em estruturas de Engenharia Civil baseadas em sistemas de vídeo integrados em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Dado que a estrutura e o VANT estão ambos em movimento, a estimativa dos deslocamentos envolve, inicialmente, a avaliação dos deslocamentos relativos entre o VANT e a estrutura, com base no rastreio de um alvo, e, posteriormente, na compensação dos movimentos VANT com base nos dados de uma Unidade de Medição Inercial (IMU). Para o efeito, foram desenvolvidas ferramentas de processamento heurístico de imagem para o rastreio do alvo, para além da implementação de uma estratégia de integração numérica para o processamento de dados da IMU. A validação da metodologia baseou-se em um teste dinâmico exploratório realizados em campo. A metodologia desenvolvida demonstrou eficiência e robustez na estimativa de deslocamentos absolutos e com potencial de integração em sistemas de monitorização da integridade estrutural (SHM).

Palavras-chave: Estruturas de Engenharia Civil, deslocamento, VANT, sistema de vídeo, IMU.

1. Introdução

A avaliação da integridade das estruturas de Engenharia Civil é um instrumento de crucial importância para os gestores de infraestruturas aferirem as suas condições de operacionalidade e possíveis necessidades de manutenção ou reabilitação. Em muitas situações, esta avaliação é realizada com base em informações obtidas a partir de sistemas SHM. Estes sistemas incluem uma vasta gama de sensores capazes de medir os efeitos das ações operacionais e ambientais, tipicamente a partir de deslocamentos, acelerações e deformações.

Nos últimos anos, os métodos baseados em visão computacional assumiram-se como alternativas competitivas para a medição dos deslocamentos integrados em sistemas SHM [1]. Alguns destes sistemas montados em VANTs foram desenvolvidos e testados em laboratório e em campo [2, 3]. Em contraste com as medições que utilizam um ponto de referência fixo, o VANT é um ponto de referência não estacionário, e, por conseguinte, os seus movimentos afetam os deslocamentos medidos da estrutura. A mudança de um ponto estacionário para um ponto de medição não estacionário constitui um desafio para a análise e processamento dos dados experimentais, nomeadamente no que diz respeito ao desenvolvimento de métodos capazes de estimar o deslocamento absoluto da estrutura, em vez do deslocamento relativo entre a câmara e a estrutura.

Para aumentar a precisão da estimativa do deslocamento absoluto, foram desenvolvidas várias técnicas de subtração dos movimentos da câmara, em particular: i) a aplicação de filtros digitais do tipo passa-alto [4], ii) o recurso a um objeto estacionário no plano de fundo [5], e iii) o recurso a uma Unidade de Medição Inercial (IMU) [6]. A primeira abordagem baseia-se na aplicação de um filtro digital passa-alto aos registos de deslocamento da câmara, e assenta no pressuposto de que os movimentos do VANT ocorrem sobretudo em frequências inferiores a 0,5 Hz, sendo que os movimentos da estrutura ocorrem em frequências mais elevadas. No entanto, a utilização de filtros passa-alto limita a capacidade de se estimar o deslocamento absoluto da estrutura, além de comprometer a

avaliação dos deslocamentos em estruturas com frequências baixas. Na segunda abordagem, o movimento da câmara é estimado com base em características extraídas de objetos estacionários de fundo, por exemplo, edifícios, vegetação fixa e rochas, normalmente localizados próximo da estrutura medida, que em algumas aplicações podem não ser fáceis de identificar. Com base na informação do movimento do VANT e no deslocamento relativo entre a estrutura e a câmara, pode ser obtido o deslocamento absoluto da estrutura. Finalmente, na terceira abordagem, a estimativa do movimento VANT baseia-se em dados fornecidos através de um sistema IMU, formado por acelerómetros e giroscópios do tipo DC capazes de responder a movimentos de muito baixa frequência (≈ 0 Hz). As estimativas dos deslocamentos e rotações do VANT são obtidas por meio da dupla integração das acelerações ou pela integração simples das velocidades angulares, respetivamente. No entanto, o procedimento de integração é afetado por erros que causam distorções nos sinais medidos, e que são amplificadas no caso de dupla integração. O sucesso do processo de integração requer consequentemente um ajuste dos sinais medidos por meio da aplicação de filtros passa-alto ou utilizando funções de ajuste lineares, bilineares ou polinomiais [7].

Neste enquadramento, o presente estudo visa dar contributos para o desenvolvimento de uma metodologia sem contacto de avaliação de deslocamentos, com base em câmaras de vídeo incorporadas em VANTs. Uma das inovações deste estudo é o desenvolvimento de uma técnica de subtração dos movimentos do VANT baseada num sistema inercial incorporado [8].

2. Metodologia de medição de deslocamentos com apoio de VANT e sistema inercial

A metodologia proposta para a medição de deslocamentos baseia-se no rastreamento de um alvo fixo à estrutura por intermédio de um sistema vídeo e um VANT, sem recurso a uma referência geográfica estática (Fig. 1).

Como a estrutura e o VANT estão ambos em movimento, através do rastreio do alvo são obtidos os deslocamentos relativos entre a estrutura e o VANT, sendo por isso necessária a avaliação e compensação dos movimentos do drone de modo a serem obtidos os deslocamentos absolutos da estrutura. O rastreio do alvo é realizado com base na aplicação de técnicas avançadas de processamento de imagem que possibilitam a determinação precisa da posição do alvo em cada imagem do vídeo. A compensação dos movimentos do drone é realizada com base no processamento dos dados registados num sistema inercial interno (IMU), composto por acelerómetros e giroscópios, com auxílio de um sistema de correção de posicionamento do tipo RTK e com apoio de uma estação local.

Os componentes do sistema de medição sem contacto de deslocamentos incluem o VANT, a câmara de vídeo e o alvo de precisão. O VANT é da marca DJI, modelo Phantom 4 RTK e possui um sistema inercial interno que inclui um acelerómetro triaxial e três giroscópios uniaxiais. Adicionalmente, o VANT possui um sistema RTK de correção de posição funcionando em conjunto com a estação local D-RTK 2 que contém um GPS geodésico de precisão e serve de referencial estático para a aeronave. Houve a necessidade de acoplar ao drone uma câmara adicional, externa e rigidamente ligada ao corpo do VANT. A câmara de vídeo externa é da marca Panasonic, modelo HC-V380. O alvo consiste num conjunto de 9 círculos de cor vermelha, com diâmetro igual a 1 cm, dispostos segundo uma grelha ortogonal.

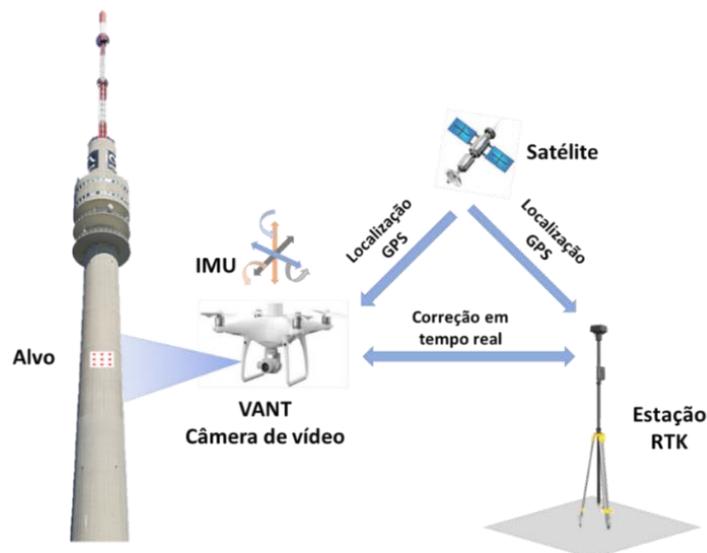


Figura 1 – Sistema de medição sem contacto de deslocamentos com recurso a VANT e sistema vídeo

3 Ferramentas de processamento de imagem e do sistema inercial

A metodologia de medição sem contacto de deslocamentos envolveu o desenvolvimento de duas ferramentas computacionais, uma de processamento heurístico de imagens de vídeo e outra de integração numérica dos sinais do sistema inercial, ambas desenvolvidas no programa Matlab (Fig. 2). A ferramenta de processamento das imagens vídeo tem como objetivo estimar os deslocamentos relativos entre o VANT e o alvo fixo à estrutura. Por sua vez, a ferramenta de integração numérica permite estimar os movimentos próprios do VANT, em particular os deslocamentos e as rotações, com base nos registos provenientes do sistema inercial interno. Da aplicação das duas ferramentas é obtida uma estimativa dos deslocamentos absolutos da estrutura a partir dos deslocamentos do rastreio dos deslocamentos registados no vídeo corrigidos pelos movimentos do VANT.

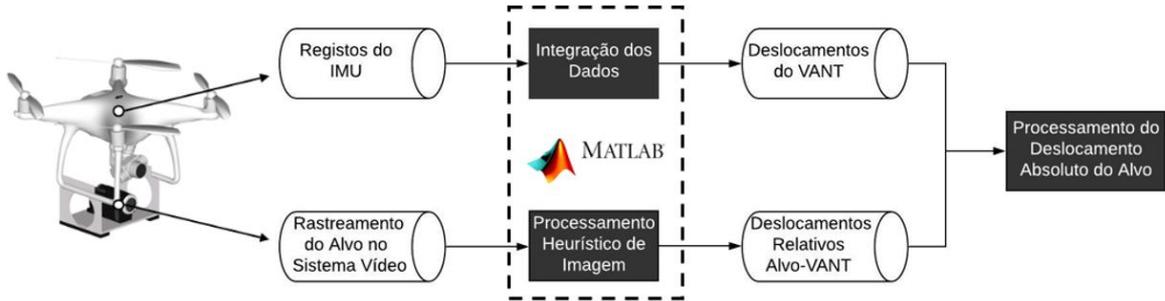


Figura 2 – Ferramentas de processamento heurístico de imagem e de integração numérica

3.1 Processamento heurístico de imagens

A Fig. 3 mostra a sequência ordenada dos operadores morfológicos que constituem o algoritmo de rastreio da imagem, além da representação gráfica do efeito da sua aplicação.

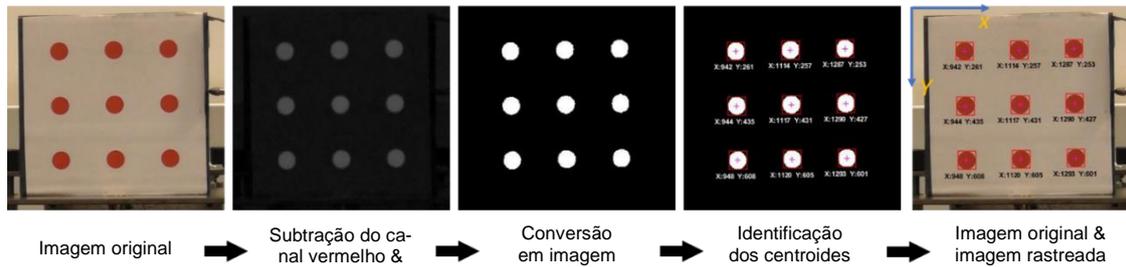


Figura 3 - Processamento heurístico das imagens para rastreio do alvo

A resolução da imagem é calculada para cada par de zonas circulares do alvo (r_i), em px/mm, num total de 6 valores (r_1 a r_6) na direção do eixo X, com base na expressão seguinte:

$$r^i = \frac{1}{6} \times \sum_{i=1}^6 \frac{X_{i+3} - X_i}{30} \quad (1)$$

onde X_i são as coordenadas no eixo X do centroide da zona circular i , em píxeis. A numeração das zonas circulares é a apresentada na Fig. 4 e a distância entre elas é igual a 30 mm.

Conhecida a resolução da imagem, o deslocamento horizontal do alvo no instante de tempo i ($\delta_V^{Y,i}$) é obtido através da seguinte expressão:

$$\delta_V^{Y,i} = \delta_V^{Y,i-1} + \left[\frac{(\sum_{j=1}^9 X_j^i - X_j^{i-1})}{9} \times \frac{1}{r^i} \right] \quad (2)$$

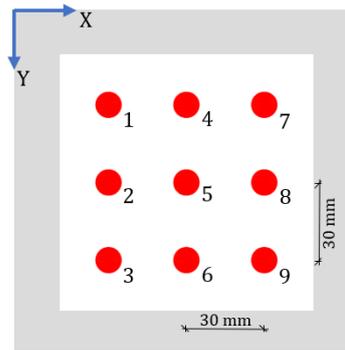


Figura 4 – Referencial para o rastreio de imagens

3.2 Processamento de dados do IMU

O deslocamento absoluto da estrutura na direção horizontal (direção Y da Fig. 6) ($\delta_S^{Y,i}$) é determinado a partir do deslocamento do alvo obtido por meio do processamento das imagens do vídeo ($\delta_V^{Y,i}$) compensado pelos movimentos do VANT ($\delta_{UAV}^{Y,i}$), para cada instante de tempo i :

$$\delta_S^{Y,i} = \delta_V^{Y,i} + \delta_{UAV}^{Y,i} \quad (3)$$

Os graus de liberdade representativos dos movimentos do VANT estão ilustrados na Fig. 6 e são referenciados ao centro geométrico do sistema inercial: três deslocamentos, segundo os eixos X, Y e Z, e três rotações, α , β e γ , em torno dos eixos X, Y e Z, respetivamente.

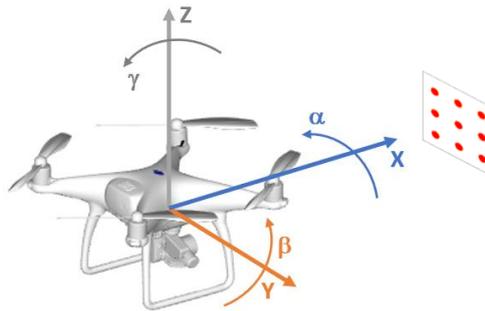


Figura 6 – Graus de liberdade de referência caracterizadores do movimento do VANT

O valor do deslocamento virtual do alvo na direção do eixo Y devido aos movimentos do VANT ($\delta_{UAV}^{Y,i}$) pode ser determinado a partir da soma de quatro parcelas do movimento do VANT:

$$\delta_{UAV}^{Y,i} = \delta_Y^{Y,i} + \delta_X^{Y,i} + \delta_\alpha^{Y,i} + \delta_\gamma^{Y,i} \quad (4)$$

onde $\delta_Y^{Y,i}$ é a parcela devida ao movimento do VANT na direção Y, $\delta_X^{Y,i}$ é a parcela devida ao movimento do VANT na direção do eixo X, cuja aproximação ou afastamento em relação ao alvo, induz, indiretamente, um movimento virtual do alvo na direção Y, $\delta_\alpha^{Y,i}$ é a parcela devida à rotação do VANT em torno do eixo X que pelo facto do sistema inercial estar distanciado do sistema vídeo induz um deslocamento virtual do alvo na direção Y, e $\delta_\gamma^{Y,i}$ é a parcela devida à rotação do VANT em torno do eixo Z e que também induz um deslocamento virtual do alvo na direção Y, onde todas as parcelas são relativas ao instante de tempo i .

A estimativa da parcela $\delta_Y^{Y,i}$ deve ter em consideração o movimento tridimensional do VANT, no qual a componente de translação na direção do eixo Y é influenciada pelas componentes de translação na direção dos eixos X e Y, em virtude de existirem rotações em torno dos vários eixos. Os registos da aceleração corrigidos do efeito rotacional $a'_X(t)$, $a'_Y(t)$, $a'_Z(t)$ segundo os eixos X, Y e Z respetivamente, são obtidos através da seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} a'_x(t) \\ a'_y(t) \\ a'_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \cos\beta & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta \sin\gamma & \cos\beta \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sendo a parcela $\delta_Y^{Y,i}$ determinada através da dupla integração do registo de acelerações na direção do eixo Y corrigido do efeito rotacional $a'_y(t)$, de acordo com a seguinte expressão (Fig. 7a):

$$\delta_Y^{Y,i} = \iint_{t_{i-1}}^{t_i} a'_y(t) \cdot dt \cdot dt \quad (6)$$

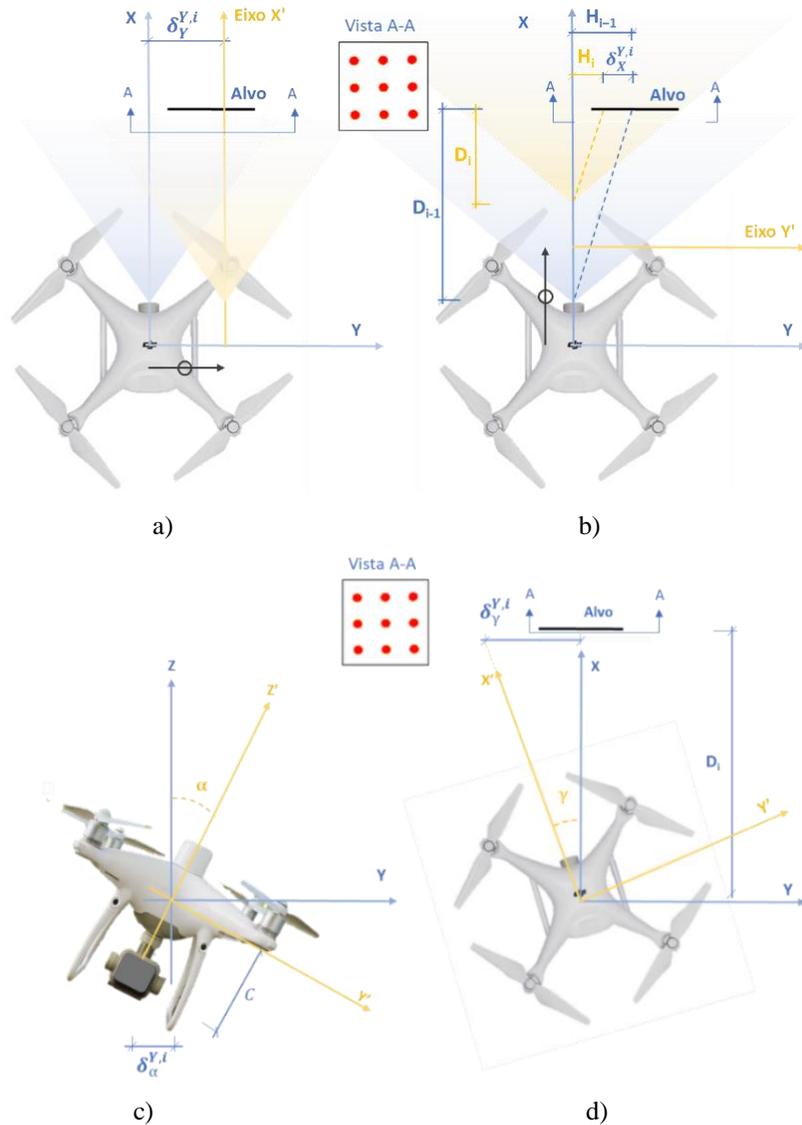


Figura 7 – Deslocamentos virtuais do alvo na direção do eixo Y devidos ao movimento do VANT: a) na direção do eixo Y ($\delta_Y^{Y,i}$), b) na direção do eixo X ($\delta_X^{Y,i}$), c) rotação em torno do eixo X ($\delta_\alpha^{Y,i}$), d) rotação em torno do eixo Z ($\delta_Y^{Z,i}$)

Além desta parcela, caso o alvo não esteja centrado em relação ao eixo X, o movimento de aproximação/afastamento do VANT em relação ao alvo (efeito de escala) origina um deslocamento virtual do alvo na direção do eixo Y ($\delta_X^{Y,i}$) obtido através da seguinte relação (Fig. 7b):

$$\delta_X^{Y,i} = (D_{i-1} - D_i) \cdot \frac{H_{i-1}}{D_{i-1}} = \iint_{t_{i-1}}^{t_i} a'_x(t) \cdot dt \cdot dt \cdot \frac{H_{i-1}}{D_{i-1}} \quad (7)$$

onde D_{i-1} e D_i são as distâncias do drone ao alvo medidas na direção do eixo X para os instantes de tempo $i-1$ e i , respetivamente, e H_{i-1} é a distância do centro do sensor da câmara ao centro do alvo medida na direção do eixo Y para o instante de tempo $i-1$.

Nas Fig. 7c e 7d apresentam-se os deslocamentos virtuais do alvo devidos às rotações do VANT em torno dos eixos X e Z, respetivamente. Estes deslocamentos são estimados com base na integração numérica simples dos registos das velocidades angulares obtidos através dos giroscópios, de modo a obterem-se as correspondentes rotações, e por aplicação das seguintes expressões:

$$\delta_{\alpha}^{Y,i} = C \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\alpha}(t) \cdot dt \quad (8)$$

$$\delta_{\gamma}^{Y,i} = D_i \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\gamma}(t) \cdot dt \quad (9)$$

onde C é a distância do giroscópio ao sensor da câmara de vídeo, D_i é a distância do VANT ao alvo segundo o eixo X, e, α e γ as rotações em torno dos eixos X e Z, respetivamente.

Assim, reescrevendo a Expressão (4), o deslocamento virtual do alvo na direção do eixo Y devido ao movimento do drone, em cada instante de tempo i , é contabilizado através da expressão:

$$\delta_{UAV}^{Y,i} = \iint_{t_{i-1}}^{t_i} a'_Y(t) \cdot dt \cdot dt + \iint_{t_{i-1}}^{t_i} a'_X(t) \cdot dt \cdot dt \cdot \frac{H_{i-1}}{D_{i-1}} + C \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\alpha}(t) \cdot dt + D_i \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\gamma}(t) \cdot dt \quad (10)$$

4 Validação da metodologia com base em ensaio em campo

O ensaio em campo consistiu na medição dos deslocamentos de um alvo fixo a uma parede com base no sistema vídeo e com o VANT em movimento. Nestas circunstâncias o alvo não se desloca, e por isso, o deslocamento virtual do alvo estimado pelo sistema vídeo é devido apenas aos movimentos próprios do VANT. O objetivo do ensaio passa pela validação do funcionamento do sistema inercial do VANT, em particular da ferramenta de integração numérica, por meio da comparação dos deslocamentos obtidos através dos sistemas inercial e vídeo. No caso de o sistema inercial funcionar adequadamente, ambos os deslocamentos serão tendencialmente iguais, e deste modo, em aplicações futuras, será possível realizar a subtração dos deslocamentos do VANT aos deslocamentos estimados pelo sistema vídeo. Na Fig. 8 ilustram-se alguns detalhes da realização do ensaio em campo, nomeadamente a localização do alvo fixado à parede, o VANT com o sistema vídeo incorporado e a estação local RTK. A distância operacional do VANT relativamente ao alvo foi variável entre 4,70 m e 5,20 m.



Figura 8 – Configuração experimental do ensaio em campo

Na Fig. 9 apresentam-se os registos dos deslocamentos horizontais do alvo obtidos por intermédio do sistema vídeo e do sistema inercial com base em um voo com a duração de 84 s. As partes inicial ([0-30]s) e final ([54-84]s) dos registos foram removidas devido ao efeito de distorção do sinal resultante da dupla integração do registo de acelerações. A observação da figura permite constatar, numa perspetiva global, uma concordância bastante boa entre os registos de deslocamentos obtidos a partir do sistema vídeo e do sistema inercial do VANT. Inclusivamente, em alguns intervalos de tempo, como sucede entre 37 s e 43 s, a concordância é muito boa. O erro relativo entre os valores médios quadráticos (RMS) dos registos é igual a + 9,32 % tomando como referência o sistema vídeo. Por sua vez, a diferença entre os valores de pico de ambos os registos é igual a -1,47 mm, a que corresponde um erro relativo de -15,56 % tomando como referência os resultados do sistema vídeo.

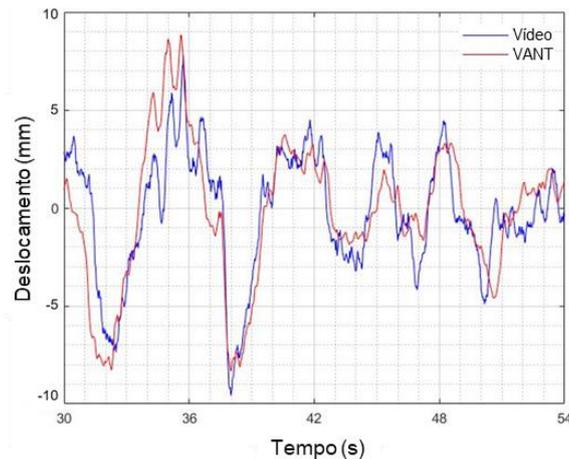


Figura 9 – Comparação dos registros de deslocamentos obtidos através do sistema vídeo e do sistema inercial

5 Conclusões

O presente artigo descreve uma metodologia para estimar deslocamentos de estruturas de Engenharia Civil com base nos dados recolhidos de um sistema de vídeo a bordo de um VANT e com apoio de um sistema inercial interno. A metodologia proposta baseia-se, em primeiro lugar, no cálculo dos deslocamentos relativos estrutura-VANT, com base no rastreamento de um alvo de precisão, e, em segundo lugar, na subtração dos movimentos do VANT a partir dos dados recolhidos na IMU, com o objetivo de se obter uma estimativa do deslocamento absoluto da estrutura alvo.

A validação da metodologia proposta baseou-se num ensaio em campo envolvendo a medição dos deslocamentos de um alvo fixado a uma parede, considerando o sistema de vídeo acoplado a um VANT não estacionário. Nestas circunstâncias, sem movimentos do alvo, o deslocamento virtual do alvo estimado pelo sistema de vídeo é devido exclusivamente aos movimentos próprios do VANT. A comparação entre os registros de deslocamento do sistema vídeo e os obtidos pela integração dos dados do IMU mostra uma boa concordância, com valores máximo relativos do RMS do erro e valores de pico iguais a 9,32% e 15,56 % respetivamente. Estes erros poderão ser parcialmente justificados pela ocorrência de pequenos deslocamentos relativos entre o VANT e o sistema de vídeo externo, devido, sobretudo, à flexibilidade na ligação entre estes componentes.

Agradecimentos. Os autores gostariam de agradecer à empresa HP Drones, em particular ao Sr. Hanniel Pontes, pelo empréstimo dos equipamentos para a realização dos ensaios.

References

- [1] Ribeiro D, Calçada R, Ferreira J, Martins T. Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system. *Engineering Structures*. 2014; 75:164-180.
- [2] Dong C, Catbas F N. A non-target structural displacement measurement method using advanced feature matching strategy. *Advances in Structural Engineering*. 2019a; Special issue 1–12.
- [3] Yoon H, Hoskere V, Park J-W, Spencer B. Cross-Correlation-Based Structural System Identification Using Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2017; 17(9):2075-1-12.
- [4] Yoon H, Shin J, Spencer B. Structural Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2018; 33(3):183-192.
- [5] Zhang X, Zeinali Y, Story B A, Rajan D. Measurement of Three-Dimensional Structural Displacement Using a Hybrid Inertial Vision-Based System. *Sensors*. 2019; 19:4083-1-25.
- [6] Garg P, Moreu F, Ozdagli A, Taha M R, Mascareñas D. Noncontact Dynamic Displacement Measurement of Structures Using a Moving Laser Doppler Vibrometer. *Journal of Bridge Engineering*. 2019; 24(9) 04019089-1-13.
- [7] Herrmann R, Moortgat-Pick A, Marx S. Vibration Analysis of Structures using a Drone (VANT) based Mobile Sensing Platform. *Proceedings of 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*. 2019; Potsdam, Germany.
- [8] Arias-Lara D, De-la-Colina J. Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records. *Measurement*. 2018; 114:261-273.
- [9] Cabral, R. Procedimentos para avaliação dos deslocamentos da torre de telecomunicações do Monte da Virgem sob ação do vento com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). *Dissertação de Mestrado*. ISEP, Porto, 2019.