

Sistema de medição de deslocamentos baseado em tecnologia vídeo a bordo de veículos aéreos não tripulados

Displacement measurement system based on video technology on board of unmaned aerial vehicles

D. Ribeiro¹ | R. Santos¹ | R. Cabral² | G. Saramago³ | R. Calçada⁴

¹CONSTRUCT, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal

²Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

⁴CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

drr@isep.ipp.pt; rps@isep.ipp.pt; rafaelaraujo.cabral@mackenzista.com.br; gabrielsaramago@poli.ufrj.br; ruiabc@fe.up.pt

resumo

Este artigo descreve uma metodologia utilizada na estimativa de deslocamentos em estruturas de Engenharia Civil com base 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, em primeiro lugar a avaliação dos deslocamentos relativos entre a estrutura e o VANT, com base no rastreamento de um alvo, e em segundo lugar a subtração do movimento do VANT a partir dos dados de uma Unidade de Medição Inercial (IMU). Para o efeito foram desenvolvidas ferramentas heurísticas de processamento de imagem de rastreamento de alvos, além da implementação de uma estratégia de integração numérica para o processamento de dados da IMU. A validação da metodologia foi baseada em ensaios dinâmicos realizados em laboratório e em campo. A metodologia desenvolvida revelou eficiência e robustez na estimativa dos deslocamentos absolutos e com potencialidades de integração em sistemas de Monitorização da Integridade Estrutural (SHM).

Palavras-chave: estruturas de engenharia civil, deslocamentos, VANTs, sistema vídeo, IMU, validação.

abstract

This article describes a methodology applied to the estimation of displacements in Civil Engineering structures based on video systems integrated in unmanned aerial vehicles (UAVs). Given that the structure and the UAV are both in motion, the estimate of displacements involves, initially, the evaluation of the structure-UAV relative displacements, based on the tracking of a target, and afterwards, the subtraction of the UAV movements based on the data from an Inertial Measurement Unit (IMU). For that purpose, heuristic image processing tools for target tracking were developed, in addition to the implementation of a numerical integration strategy for the IMU data processing. The validation of the methodology was based on dynamic tests performed in the laboratory and in the field. The developed methodology demonstrated efficiency and robustness in the estimation of absolute displacements and with potential for integration in Structural Health Monitoring (SHM) systems.

Keywords: Civil engineering structures, displacements, UAVs, video system, IMU, validation.

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 de Monitorização da Integridade Estrutural (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.

As medições de deslocamentos têm sido particularmente relevantes na identificação modal (Yoon et al., 2016), identificação de danos estruturais (Song et al., 2016) e avaliação da segurança estrutural (Ribeiro et al. 2019), entre outros. Nos últimos anos, os métodos baseados em visão computacional assumiram-se como alternativas competitivas para a medições dos deslocamentos integrados em sistemas SHM (Dong & Catbas, 2019). Alguns destes sistemas montados em VANTs foram desenvolvidos e testados em laboratório e em campo (Yoon et al., 2017 e 2018). O uso de VANTs tem várias vantagens, nomeadamente: i) a possibilidade de posicionar o sistema de vídeo com um campo de visão adequado em relação à estrutura, evitando distorções de perspectiva e acedendo facilmente a localizações remotas e em condições potencialmente perigosas, ii) captura de imagens a distâncias mais curtas e com maior precisão, e iii) minimização dos efeitos das condições atmosféricas uma vez que o VANT pode ser posicionado na proximidade imediata da estrutura.

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 (Garg et al., 2019), ii) o recurso a um objeto estacionário no plano de fundo (Zhang et al., 2019), e iii) com recurso a uma Unidade de Medição Inercial (IMU) (Herrmann et al., 2019).

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 muito 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 amplificados 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 (Arias-Lara & De-la-Colina, 2018).

Assim, este 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. O rastreamento do alvo artificial baseia-se em técnicas heurísticas de processamento de imagem especificamente direcionadas para a caracterização dos movimentos horizontais do alvo. Este tipo de deslocamento tem sido utilizado em muitas situações como indicador de avaliação da operacionalidade e segurança de pontes (Moreu et al., 2016), edifícios (Zheng et al., 2019) e torres de telecomunicações (Ribeiro et al., 2019). Uma das inovações deste estudo é o desenvolvimento de uma técnica de subtração dos movimentos do VANT baseada num sistema inercial incorporado (Cabral, 2019).

2- METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM APOIO DE VANT E SISTEMA INERCIAL

2.1. Conceito

A metodologia proposta para a medição sem contacto 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).

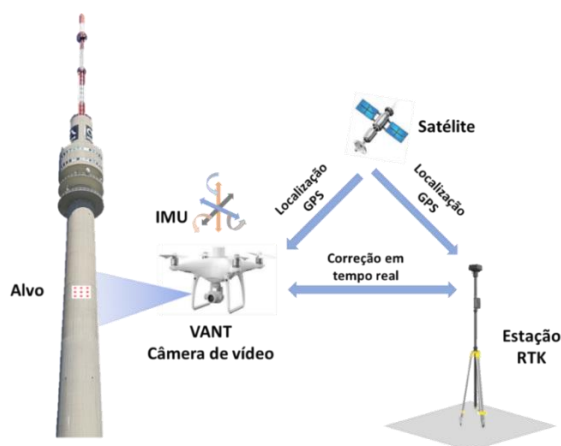


Fig. 1 | Sistema de medição sem contacto de deslocamentos com recurso a VANT e sistema vídeo

Como a estrutura e o VANT estão ambos em movimento, através do rastreamento 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 rastreamento 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.

2.2. Componentes

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, possibilita uma carga máxima transportada igual a 1,4 kg e apresenta uma autonomia de voo de cerca de 28 min. O drone 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, e apresenta uma resolução máxima igual 1920×1080 px, frequência de aquisição de 60 fps e um zoom ótico de 50×. A câmara está apoiada sobre um suporte em alumínio que por sua vez está fixo ao corpo do VANT através de abraçadeiras em PVC. O alvo consiste num conjunto de 9 círculos de cor vermelha, com diâmetro igual a 1 cm, dispostos segundo uma grelha ortogonal com afastamento igual a 3 cm, e assentes sobre uma base quadrada, de cor branca e 10 cm de lado.

3- FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM E INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

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 rastreamento dos deslocamentos registados no vídeo corrigidos pelos movimentos do VANT.

3.1. Processamento heurístico de imagens

A metodologia de rastreamento do alvo é baseada na aplicação de operadores morfológicos, sobretudo da segmentação, que envolvem a divisão de cada imagem em regiões (conjuntos de píxeis) com similaridade de uma propriedade, neste caso de cor. A Fig. 3 mostra a sequência ordenada dos operadores morfológicos que constituem o algoritmo de rastreo da imagem, com a indicação do comando Matlab associado a cada um dos operadores, além da representação gráfica do efeito da sua aplicação.

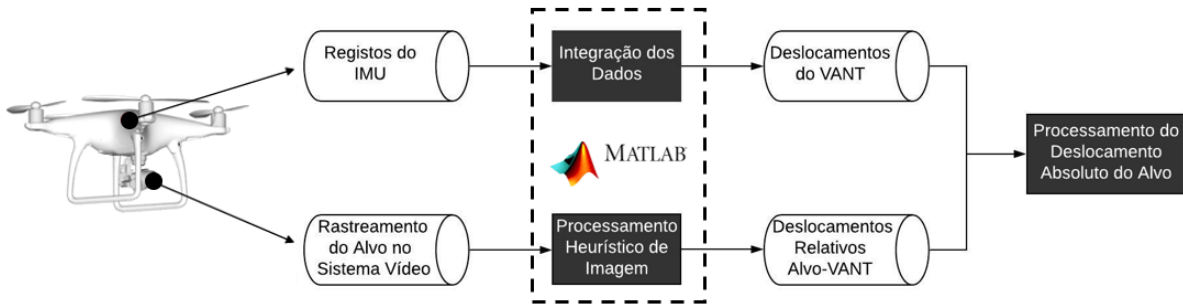


Fig. 2 | Ferramentas de processamento heurístico de imagem e de integração numérica

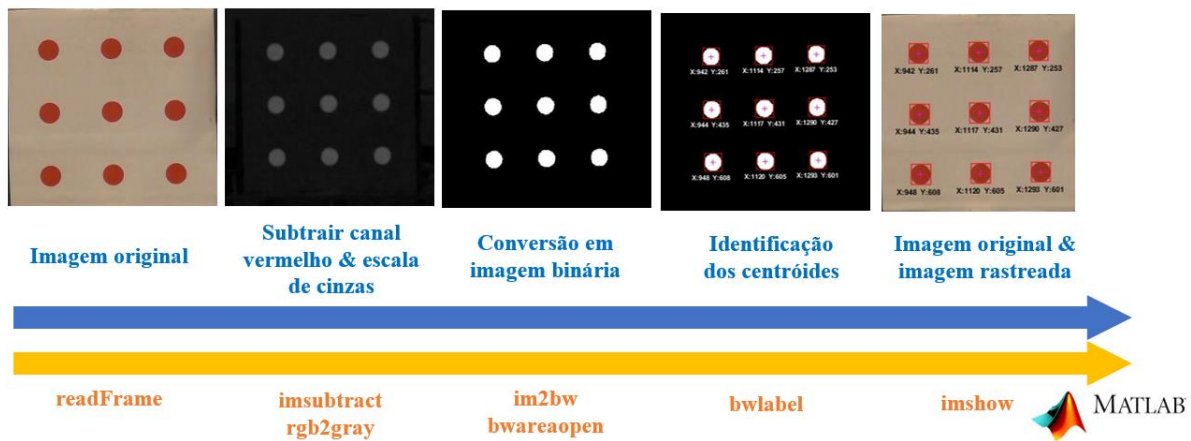


Fig. 3 | Processamento heurístico das imagens para rastreamento do alvo

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:

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

onde X_i são as coordenadas no eixo X do centróide 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 ($\delta_V^{X,i}$) é obtido através da seguinte expressão:

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

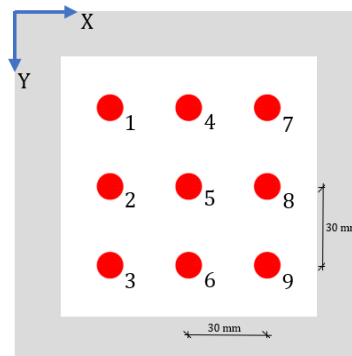


Fig. 4 | Referencial para o rastreamento de imagens

3.2. Processamento dos dados do IMU

3.2.1. Aspectos gerais

A Fig. 5 ilustra a sequência ordenada das operações de processamento de sinal incluídas no algoritmo de integração numérica, com a indicação do comando Matlab associado a cada operador, bem como a representação gráfica do efeito da sua aplicação. A integração numérica foi realizada recorrendo à Regra dos Trapézios por intermédio do comando *cumtrapz*.

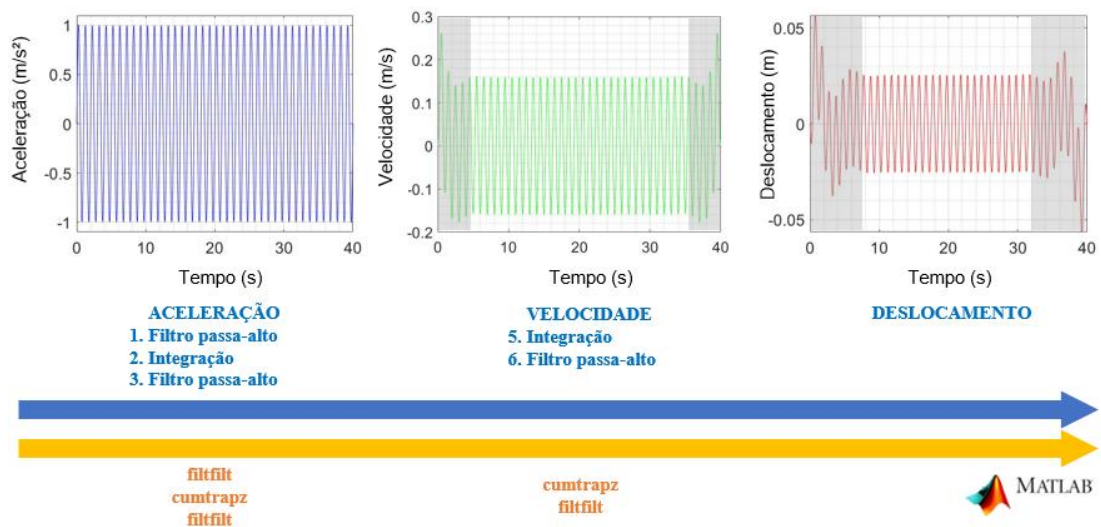


Fig. 5 | Ferramenta de integração numérica de sinais

O filtro passa-alto utilizado após cada integração numérica é do tipo FIR-Kaiser com uma frequência de corte variável, geralmente entre 0.10 Hz e 0.50 Hz. Este filtro permite remover os erros gerados na integração numérica em baixas frequências, atuando especificamente na remoção da componente constante resultante de cada integração. No entanto, associado à aplicação de filtros passa-alto de correção do sinal, surgem distorções da parte inicial e final dos registos, sendo por isso recomendada a desconsideração destas duas parcelas dos registos. O efeito das distorções dos sinais é bem visível nos registos de velocidade e deslocamento apresentados a título exemplificativo na Fig. 9 e assinalado a cor cinza.

3.2.2. Formulação matemática

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 ($\delta_V^{Y,i}$), conforme detalhado na secção 3.1, 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.

O 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:

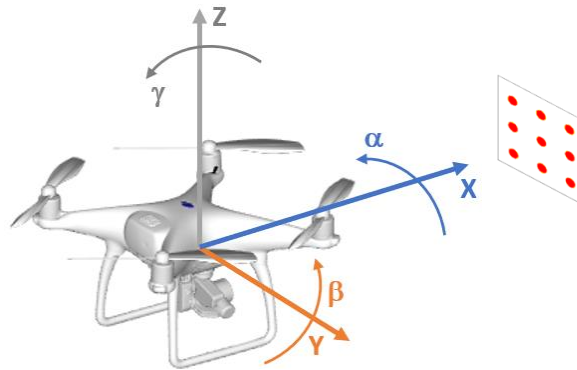


Fig. 6 | Graus de liberdade de referência caracterizadores do movimento do VANT

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

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):

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

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):

$$\delta_X^{Y,i} = (D_{i-1} - D_i) \cdot \frac{H_{i-1}}{D_{i-1}} \quad (7)$$

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 $i-1$.

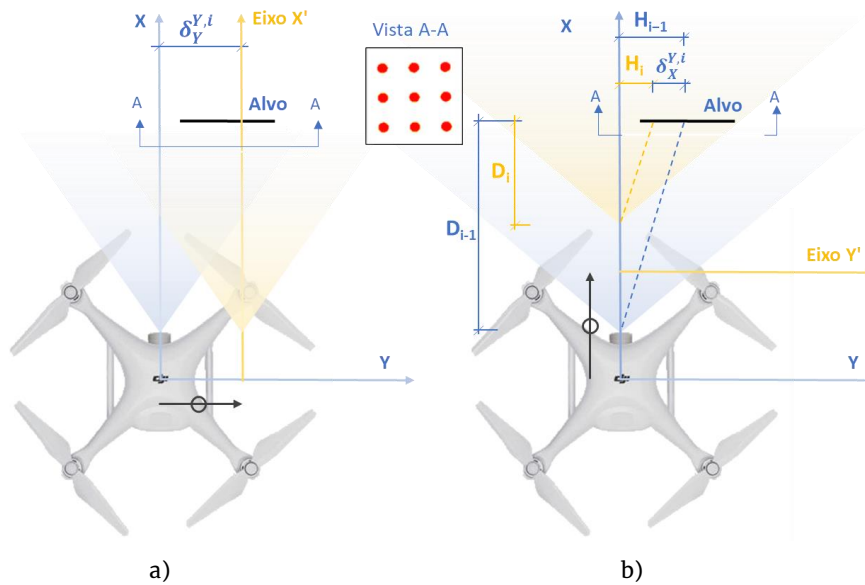


Fig. 7 | Deslocamentos virtuais do alvo na direção do eixo Y devidos ao movimento do VANT na direção dos eixos: a) Y ($\delta_Y^{Y,i}$), b) X ($\delta_X^{Y,i}$) (ambas as representações em planta)

Nas Fig. 8a e 8b 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.

A distância D_i entre o sensor da câmara de vídeo e o alvo, para o instante de tempo i , é obtida através da distância focal (f), a dimensão horizontal do sensor da câmara de vídeo (h) e a dimensão horizontal do campo de visão (H_i), a distância D_i pode ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$D_i = \frac{f}{h} \cdot H_i \quad (10)$$

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:

$$\delta_{UAV}^{Y,i} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} a'_Y(t) \cdot dt + (D_{i-1} - D_i) \cdot \frac{H_{i-1}}{D_{i-1}} + C \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\alpha}(t) \cdot dt + D_i \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\gamma}(t) \cdot dt \quad (11)$$

onde os valores de D_{i-1} e D_i podem ser obtidos por aplicação da Expressão (10).

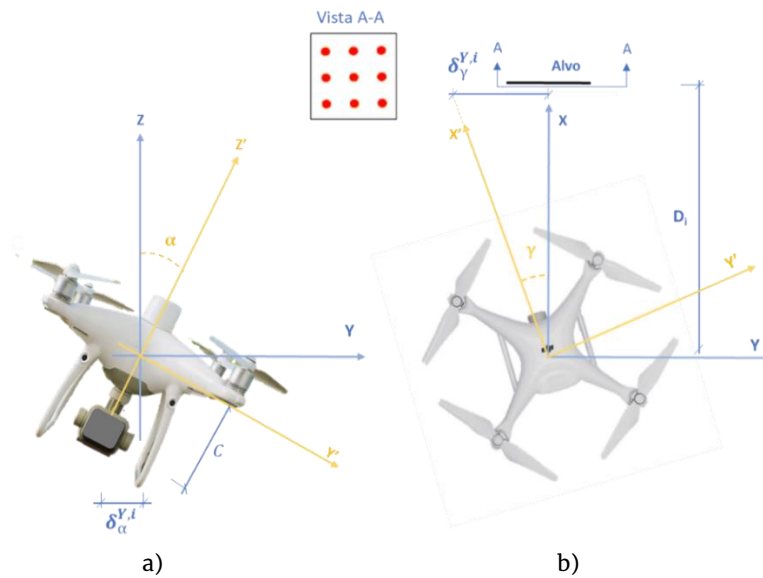


Fig. 8 | Deslocamentos virtuais do alvo na direção do eixo Y devidos à rotação do VANT em torno dos eixos: a) X ($\delta_{\alpha}^{Y,i}$) (representação em alçado), b) Z ($\delta_{\gamma}^{Y,i}$) (representação em planta).

4- VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA COM BASE EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1. Ensaio em laboratório

O ensaio em laboratório consistiu na medição dos deslocamentos horizontais com auxílio de um sistema vídeo e um LVDT, de um alvo móvel posicionado sobre uma mesa vibratória (Fig. 9).

O objetivo deste ensaio passou pela comparação dos registos de deslocamentos obtidos através do LVDT com os registos de deslocamentos obtidos através do sistema vídeo, de modo a validar a ferramenta de processamento de imagens vídeo.

O sistema vídeo foi posicionado a cerca de 1,5 m do alvo e acoplado ao VANT que foi mantido em repouso. A câmara foi ajustada para captar imagens em formato de elevada resolução (1920×1080) e taxa de aquisição igual a 50 fps. O alvo foi colado a uma cantoneira metálica fixa à mesa vibratória. Por sua vez, o sistema de medição com contacto envolveu a instalação de um LVDT com retorno por mola, da marca RDP modelo ACT1000A. A ponteira do LVDT está em contacto direto com a cantoneira metálica onde o alvo foi colado, enquanto o corpo do LVDT foi suportado por meio de uma base magnética fixa a um tripé assente no pavimento. A aquisição do sinal do acelerómetro e do LVDT foi realizada através de um sistema de aquisição de dados portátil da NI, modelo cDAQ USB-9162, e por intermédio de um módulo IEPE de 24-bits.

Na Fig. 10 apresenta-se a comparação dos registos de deslocamentos obtidos através do LVDT e do sistema vídeo e considerando as frequências do movimento da mesa vibratória variáveis entre 0.5 Hz e 2.0 Hz. As partes inicial e final dos registos foram removidas devido ao efeito de distorção do sinal resultante da dupla integração do registo de acelerações. Numa perspetiva global existe uma excelente concordância entre os registos de deslocamentos obtidos através do LVDT e da câmara de vídeo, quer em frequência de vibração quer em amplitude. Em termos de valores de pico, a maior diferença entre os valores do sistema vídeo e do LVDT é igual a 0.094 mm, para o caso da frequência de vibração de 2.0 Hz, que é um valor inferior à resolução das imagens digitais, igual a 0.145 mm/px.

4.2. 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.

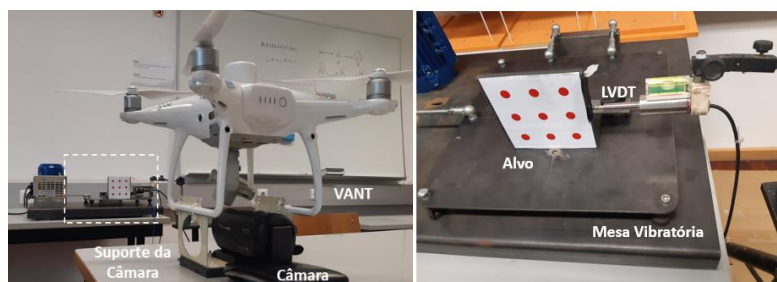


Fig. 9 | Configuração experimental do ensaio em laboratório

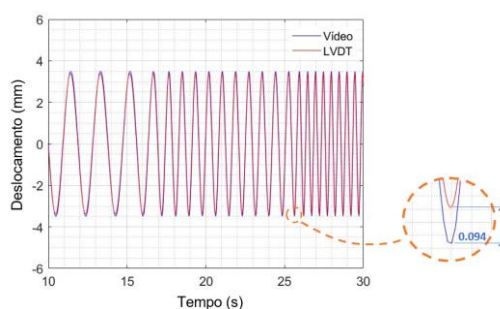


Fig. 10 | Comparação dos registos de deslocamentos do LVDT e do sistema vídeo considerando frequências do movimento da mesa vibratória variáveis entre 0.5 Hz e 2.0 Hz

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 do 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. 11 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. O principal constrangimento à realização do ensaio relacionou-se com autonomia limitada das baterias do VANT devido ao acréscimo do peso útil, por incorporação da câmara externa e à ligação permanente ao RTK, e que condicionaram a duração dos voos a períodos de tempo não superiores a 3 min.

Na Fig. 12. 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 +13.1 % tomando como referência o sistema vídeo. Por sua vez, a diferença entre os valores de pico de ambos os registos é igual a -1.24 mm, a que corresponde um erro relativo de -12.9 % tomando como referência os resultados do sistema vídeo.



Fig. 11 | Configuração experimental do ensaio em campo

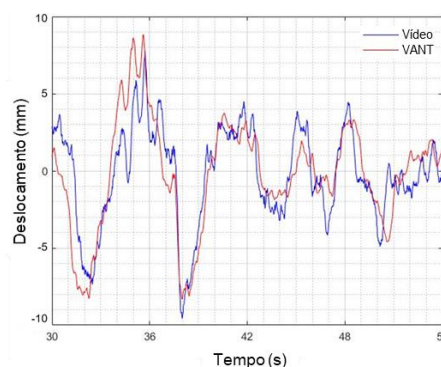


Fig. 12 | Comparação dos registos de deslocamentos obtidos através do sistema vídeo e do sistema inercial

4- 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.

O processamento de imagem baseia-se em técnicas heurísticas, em particular na operação da segmentação, enquanto o processamento dos dados da IMU, especificamente dos acelerómetros e giroscópios do tipo DC, é baseado na aplicação de uma estratégia eficiente de integração numérica. O sucesso do processo de integração requer uma correção de base dos registos, realizado por filtros digitais passa-alto e num controlo rigoroso dos erros de distorção que ocorrem nas partes inicial e final dos registos. A estimativa dos deslocamentos absolutos exigirá períodos de medição maiores, porque para frequências de corte muito baixas, as partes afetadas dos registos podem assumir valores de tempo significativos, em muitas situações próximos de 60 s.

A validação da metodologia proposta baseou-se em ensaios dinâmicos realizados em laboratório e em campo. O ensaio laboratorial envolveu a medição dos deslocamentos de um alvo em movimento, posicionado sobre uma mesa sísmica, através de um LVDT e de um sistema de vídeo incorporado a um VANT em posição estacionária. Os resultados obtidos demonstraram uma excelente concordância entre as duas estimativas do deslocamento, tanto em frequência como em amplitude. Por sua vez, o ensaio em campo consistiu em medir os 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 registos de deslocamento do sistema vídeo e os obtidos pela integração dos dados do IMU mostra uma boa concordância, com valores máximo e RMS do erro iguais a 1,24 mm e 12,9 % 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 de equipamentos para a realização dos ensaios, e aos Professores Jorge Justo e Fernando Ferreira, do DEM-ISEP, pela disponibilização dos equipamentos do Laboratório de Mecânica Aplicada.

REFERÊNCIAS

- Arias-Lara D., De-la-Colina J. Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records. *Measurement*. 2018; 114:261-273.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Moreu F., Li J., Jo H., Kim R. E. Reference-Free Displacements for Condition Assessment of Timber Railroad Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2016; 21(2):04015052-1-12.
- 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.
- Ribeiro D., Leite J., Pinto N., Calçada R. Continuous monitoring of the dynamic behaviour of a high-rise telecommunications tower. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019; 28(11): e1621.
- Song J., Gu C., Su H., Gu H., Huang X. Observed displacement data-based identification method of structural damage in concrete dam. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 66:202-211.
- Yoon H., Elanwar H., Choi H., Golparvar-Fard M., Spencer B. Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. *Structural Control and Health Monitoring*. 2016; 23(12):1405-1416.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zheng C., Liu Z., Wu T., Wang H., Wu Y., Shi X. Experimental investigation of vortex-induced vibration of a thousand-meter-scale mega-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2019; 85:94-109.