

Projeto ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas

Maria João HENRIQUES^{1*}, Tiago PINTO², Duarte DORNELLAS³, Jorge GONÇALVES³, Ricardo RIBEIRO³, Alexandre BERNARDINO³ e José SANTOS-VICTOR³

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil

² TEKEVER ASDS

³ Instituto de Sistemas e Robótica / Instituto Superior Técnico

(mjoao@lnec.pt ; tiago.pinto@tekever.com; duarte.dornellas@tecnico.ulisboa.pt; jorgeguilherme95@gmail.com; ribeiro@isr.tecnico.ulisboa.pt; alexandre.bernardino@tecnico.ulisboa.pt; jasv@isr.tecnico.ulisboa.pt)

Palavras-chave: UAV, *drone*, monitorização, estrutura

Resumo: O projeto "ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas", financiado pelo programa COMPETE, tem como objetivo o desenvolvimento de um multicóptero destinado à realização autónoma de levantamentos de superfícies verticais, nomeadamente de paramentos de barragens, pilares de pontes, fachadas de edifícios e de monumentos. Esta aeronave irá capturar imagens para uma posterior avaliação de anomalias e navegar através de câmaras, sensores e algoritmos dedicados sem o auxílio de sistemas GNSS. O sistema está a ser desenvolvido por um consórcio, liderado pela empresa TEKEVER ASDS, e integrando o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico. Na primavera de 2018 começaram os testes envolvendo um protótipo sendo que a presente comunicação se destina a apresentar o projeto e os resultados alcançados no primeiro ano de atividade.

1. Introdução

O projeto ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas, um projeto em co-promoção financiado pelo programa Compete, está a ser desenvolvido por um consórcio de três entidades: a empresa TEKEVER ASDS (líder do projeto), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico (IST/ISR).

Este projeto nasceu da constatação que no mercado não existem aeronaves, de pequenas dimensões (vulgo UAV, *unmanned aerial vehicle*, ou *drone*) capazes de efetuar voos de forma autónoma em locais onde a propagação de sinais GNSS está estrangida ou é, até, nula. É exemplo do primeiro caso a proximidade de superfícies verticais (paramentos de barragens em abóbada, pilares de pontes, etc.) locais estes onde há limitações à receção de sinais pelas obstruções provocadas pelas estruturas. No segundo caso encontram-se os levantamentos realizados no interior de edifícios.

De referir que este tipo de naves pode contribuir de forma extremamente importante para as inspeções visuais de estruturas, nomeadamente as de engenharia civil. Acresce-se que, no caso das grandes barragens e também das barragens que apresentam um risco elevado, as inspeções visuais são obrigatórias dadas as consequências que podem resultar de situações de rutura ou acidente grave com possibilidade de perda de vidas humanas e elevados custos económicos.

Durante as inspeções as anomalias devem ficar registadas em fotografia para atestar a sua ocorrência e também para poder, se necessário, efetuar estudos de evolução tendo por base a comparação de imagens. Em estruturas de grande dimensão é difícil, e muito oneroso, o acesso ao exterior da estrutura (aos paramentos das barragens, ao topo dos pilares de pontes ou viadutos, etc.) pelo que o uso de aeronaves, de pequena dimensão, capazes de realizar voos na proximidade das estruturas, naves estas de custo não muito elevado, é uma mais-valia pelo baixo custo com que poderão ser obtidas fotografias de proximidade.

As fotografias, se obtidas seguindo regras da fotogrametria (Szeliski, 2006) - sobreposição elevada entre fotografias, distância do voo à estrutura sem grandes variações - de modo a garantir o melhor resultado possível, poderão ser utilizadas para gerar ortomosaicos e/ou nuvens de pontos das superfícies fotografadas. Estes dois produtos têm uma importância elevada para os responsáveis pela segurança de estruturas pois têm uma métrica associada - podem ser efetuadas medições de comprimentos, áreas ou volumes – e a informação extraída poderá ajudar na tomada de decisões sobre intervenções nas estruturas. Para além disso, estas avaliações estruturais podem ser feitas remotamente, através da análise do ortomosaico e/ou nuvem de pontos, reduzindo, com isso, os fatores de risco descritos acima.

O trajeto de voo das aeronaves pode ser realizado de forma manual ou autónoma. Nos voos autónomos o trajeto do voo é pré-definido sendo que, para o cumprir, a aeronave recorre aos sinais emitidos pelos satélites GNSS os quais permitem que esta determine a sua posição e defina a direção do voo. Para tal as aeronaves integram um recetor GNSS e um piloto automático com capacidade de processamento. Este tipo de voo (o autónomo) traz vantagens em relação a um voo comandado manualmente pois existe uma maior certeza no cumprimento do plano de voo, nomeadamente na manutenção de distâncias muito constantes em relação à superfície fotografada, e na observância da sobreposição entre fotografias.

No entanto, os voos autónomos necessitam que a aeronave receba sinais GNSS de um número elevado de satélites. Uma estrutura pode impedir a receção de sinais de vários satélites, levando a voos com erros de trajeto de dezenas de metros. E voos em interiores não podem recorrer a sinais GNSS para controlo do voo. Para colmatar estas limitações, torna-se necessário dotar a aeronave com um conjunto adicional de sensores que permitam obter simultaneamente maior precisão e robustez na estimação da posição da aeronave.

O projeto ELEVAR propõe disponibilizar um serviço que consiste na utilização de uma aeronave autónoma que, por estar equipada com sensores e algoritmos de navegação por visão, a desenvolver no âmbito do projeto, poderá ser aplicada em inspeções visuais de estruturas de engenharia civil em locais onde os sinais GNSS são inexistentes ou insuficientes. A escolha do conjunto de sensores visual-inercial apoiou-se nos sucessos recentes das aplicações (Maimone *et al.*, 2007; Blösch *et al.*, 2010; Geiger *et al.*, 2012) e na complementaridade de câmaras (sensores exteroceptivos) e acelerómetros/giroscópios (sensores propioceptivos). O projeto prevê ainda o desenvolvimento de algoritmos para processamento das fotografias adquiridas de forma a poder fornecer ao cliente produtos finais, necessários para avaliação de segurança de estruturas de engenharia civil.

A presente comunicação destina-se a divulgar o projeto ELEVAR e os desenvolvimentos efetuados no primeiro ano do projeto por cada uma das três entidades envolvidas.

2. A intervenção da TEKEVER ASDS no ELEVAR

A empresa TEKEVER ASDS desenvolve tecnologias e novos produtos para a área aeroespacial, defesa e segurança do grupo TEKEVER até estes atingirem um certo nível de maturidade que justifique uma estratégia de comercialização. Para este fim, a TEKEVER ASDS aposta em atividades de investigação que permitam acelerar o processo de desenvolvimento de tecnologias tais como sistemas de comunicações espaciais e plataformas aéreas não-tripuladas.

Sendo a entidade líder do projeto, a TEKEVER ASDS é responsável pela gestão e coordenação de tarefas, de modo a garantir um desenvolvimento coerente entre as mesmas dentro do tempo esperado, sendo também responsável pelas atividades de comunicação e divulgação de resultados do projeto. Numa perspetiva mais técnica, a TEKEVER ASDS é responsável pelo desenvolvimento do conceito de operação da plataforma ELEVAR e da aeronave a ser utilizada. Além disso, a empresa terá também a seu cargo a experimentação, integração e verificação dos sistemas e realizará alguns voos de teste que culminarão numa demonstração em ambiente real para entidades interessadas e relevantes na área problemática abordada pelo ELEVAR.

O trabalho realizado até à data pela TEKEVER ASDS corresponde à definição do conceito de operação, realizado juntamente com o ISR-IST, que consiste numa navegação autónoma baseada em visão estereoscópica recorrendo a algoritmos que permitam construir o ambiente tridimensional circundante para auxiliar a navegação do piloto automático nos momentos em que o sinal GNSS seja fraco ou não possa oferecer a integridade necessária. O conceito de operação permitiu definir as seguintes funcionalidades da plataforma ELEVAR:

- *Path Following* – Seguimento de coordenadas pré-definidas;
- *Geofencing* – manter autonomamente a aeronave dentro de limites geográficos pré-estabelecidos;
- *Return to Home* – guiamento autónomo e em segurança da aeronave para uma coordenada de aterragem pré-definida;
- *Obstacle Avoidance* – manter uma distância de segurança entre a aeronave e a estrutura a analisar;
- Deteção de anomalias no sistema – monitorização contínua do estado da aeronave e sinalização em caso de alerta.

A TEKEVER ASDS desenvolveu também a aeronave não-tripulada que permite dar resposta aos requisitos do projeto, ou seja, que pode embarcar a bateria, câmaras, sensores e outros sistemas de processamento necessários. Esta aeronave consiste num quadricóptero de 86 cm de diâmetro (entre rotores) e 46 cm de altura, podendo atingir uma autonomia de 18 min para um *payload* de 1 kg utilizando uma bateria de 2000 mAh. Esta aeronave foi sujeita a vários testes internos durante o seu período de desenvolvimento até se garantir que o sistema navega e se comporta nas condições desejadas. Após a finalização dos testes internos, a aeronave foi testada em ambiente operacional na barragem de Fagilde, concelho de Mangualde. Na Figura 1 é possível observar a aeronave nos momentos antecedentes a um dos testes realizados nesta barragem. Estes testes foram realizados ainda sem a integração do sistema de navegação por visão que está prevista para os próximos meses do projeto. Ainda assim, este teste permitiu validar a navegação manual da aeronave junto a barragens tendo já como *payload* a câmara de alta resolução necessária para a aquisição de imagens que permitirão gerar os produtos finais, tais como ortomosaicos, para avaliação das estruturas.



Figura 1 – Aeronave da plataforma ELEVAR no teste em ambiente de obra.

3. A intervenção do LNEC no ELEVAR

O LNEC tem por missão empreender, coordenar e promover a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico, tendo em vista o contínuo aperfeiçoamento e a boa prática da Engenharia Civil. A sua atividade prioritária é a de contribuir para a criação, desenvolvimento e difusão da investigação em domínios relacionados com a engenharia civil.

No projeto, a maior intervenção do LNEC ocorre no início, na definição dos requisitos a que a aeronave deverá obedecer, e no final, na verificação da qualidade dos voos e dos produtos gerados. Estando atualmente sensivelmente a meio do projeto, foi só cumprida, como previsto no projeto, a primeira parte da intervenção do LNEC. Para além destas duas atividades o LNEC, acompanha o desenvolvimento do projeto, constituindo-se como entidade privilegiada para estabelecer contactos com entidades que possam colaborar nos testes.

4. A intervenção do Instituto de Sistemas e Robótica no ELEVAR

No ELEVAR participa uma equipa do laboratório de Visão por Computador do ISR. O ISR é uma unidade de investigação do IST onde são desenvolvidas atividades de investigação multidisciplinar avançada nas áreas da Robótica e Processamento de Informação, incluindo Sistemas e Teoria do Controlo, Processamento de Sinal, Visão por Computador, Otimização, Inteligência Artificial e Sistemas Inteligentes, Engenharia Biomédica.

No ELEVAR o ISR centrar-se-á na investigação e desenvolvimento de sistemas e algoritmos para a navegação por odometria visual e inercial assim como, paralelamente, na reconstrução 3D das estruturas, para a navegação dos veículos nas proximidades evitando colisões, e na criação de ortomosaicos para a análise de imagens das estruturas com vista à deteção de anomalias. Contribuirá também para a especificação e definição dos sistemas de aquisição de imagem, processamento e controlo a utilizar no projeto.

O conceito base de operação da plataforma ELEVAR consiste em navegação por visão. Esta navegação torna-se possível recorrendo a uma câmara estereoscópica que permite a reconstrução 3D do ambiente circundante à aeronave e que é usado como entrada para o cálculo autónomo da posição e do mapeamento da estrutura.

4.1 Sistema de aquisição de imagens para navegação

O sistema desenvolvido, mostrado na Figura 2, tem como sensores duas câmaras monocromáticas (Point Grey BlackFly), e um sensor inercial (XSens MTi), que inclui um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro. Por forma a garantir o sincronismo das medições, utilizou-se um sinal de *trigger* gerado por um microcontrolador (Arduino Nano), também responsável pela interface com os interruptores e LEDs no exterior da caixa. Incluiu-se também uma placa computacional (Nvidia Jetson TX2) responsável pelo processamento *onboard*, bem como uma bateria LiPo 3S para garantir a alimentação deste conjunto.



Figura 2 – Protótipo do sistema de sensores

Apesar de nesta fase a integração com a aeronave ainda não ter sido feita, o sistema já foi utilizado para a gravação de um conjunto de dados, tendo para esse efeito sido transportado manualmente num ensaio realizado na barragem de Fagilde. Estes dados são usados para teste dos algoritmos desenvolvidos.

4.2 Algoritmo de navegação por visão

A navegação por visão, usando um sistema estereoscópico calibrado, é feita incrementalmente, calculando a transformação entre instantes de captura consecutivos. A detecção de pontos salientes nas imagens das duas câmaras permite a sua triangulação, o que permite gerar uma nuvem de pontos. O seguimento desta nuvem de pontos, através da sua re-deteção no *frame* seguinte, aliados ao pressuposto de que estes são estáticos, permite estimar a rotação e translação que o conjunto de câmaras sofreu entre *frames*. A concatenação destas transformações corresponde à trajetória do conjunto dos sensores, e a nuvem de pontos gerada a um mapa esparsa do ambiente observado.

Existem, contudo, algumas limitações nos sistemas de visão estereoscópica. Assumindo por hipótese a situação em que a distância entre câmaras é significativamente inferior à distância ao ambiente observado, as imagens captadas serão praticamente iguais, não existindo disparidade entre elas. Nesta situação, os pontos detetados não são trianguláveis, uma vez que os raios óticos são paralelos, e a escala do ambiente (e, portanto, da trajetória) deixa de ser observável - o conjunto degenera no caso monocular. Esta é uma das justificações para a utilização paralela de sensores inerciais, que não só resolvem esta limitação como contribuem para um aumento global da precisão da trajetória estimada.

Como análise preliminar, utilizou-se o código *open-source* do algoritmo proposto por Mur-Artal e Tardós (2017) aplicado a parte de uma das trajetórias gravadas na barragem de Fagilde, correspondente à subida de um lance de escadas. Obteve-se o resultado que se apresenta em duas vistas na Figura 3, em que o mapeamento esparsa se representa a preto, e a trajetória estimada a azul.

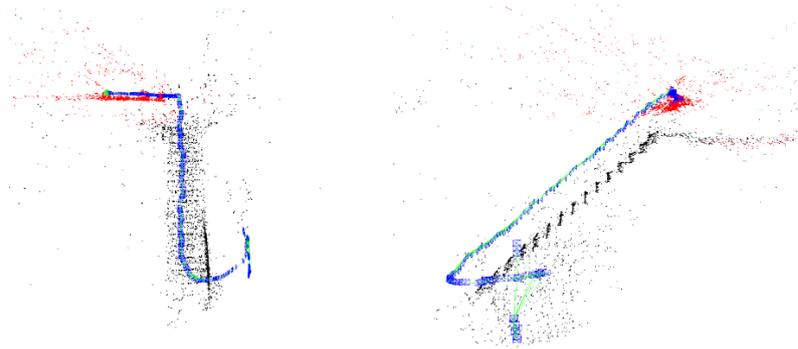


Figura 3 – Trajetória estimada e região mapeada (duas vistas – frontal e lateral)

Uma vez que no ensaio da barragem de Fagilde era impraticável ter medições diretas de posição com que comparar os resultados obtidos (*ground truth*), a avaliação é, ainda que aparentemente positiva, apenas qualitativa. De forma a aferir a precisão dos resultados obtidos, a próxima etapa passará por gravar em laboratório, e usando um sistema de *motion capture*, um conjunto de trajetórias com esta informação. Este conjunto de dados permitirá fazer uma análise quantitativa da *performance* dos algoritmos desenvolvidos, bem como validar o sistema proposto.

4.3 Criação de Ortomapas

De modo a juntar várias imagens numa mesma cena, é usado o algoritmo *feature based alignment* (Brown e Lowe, 2007), que consiste em detetar *features* (pontos de interesse) presentes em cada imagem e de seguida realizar o processo de correspondência (*matching*) das *features* que forem comuns, de modo a obter a informação acerca dos pontos em que as imagens se sobrepõem. Obtendo estes *matches*, é possível calcular o modelo geométrico que define a transformação dos pontos de uma imagem para a outra. Este processo é realizado entre todas as imagens de modo a estimar os parâmetros das transformações geométricas de cada imagem para um referencial comum (o referencial do mosaico final). De modo a otimizar estes parâmetros estimados através das *features*, é aplicado um método de otimização bastante robusto chamado *Bundle Adjustment* (Triggs *et al.*, 1999). Depois de ser otimizada, esta informação geométrica relativa pode ser usada para transformar as coordenadas de cada imagem para coordenadas do mosaico final, obtendo-se assim uma imagem única com informação referente a todas as fotografias individuais.

Contudo, alguma computação ainda será necessária visto que o mosaico obtido neste ponto ainda apresenta defeitos visíveis, nomeadamente notando-se as margens de cada imagem, vulgarmente conhecidas como “costuras” (*seams*). Para além disso, existem ainda algumas imperfeições devido a diferenças de iluminação entre imagens, bem como outros aspetos que tornam o mosaico final visualmente imperfeito. Para colmatar estes problemas, são utilizados algoritmos desenhados para harmonizar estas ligações e corrigir as imperfeições de modo a que a imagem final seja mais apelativa visualmente e mais próxima da realidade.

A Figura 4 apresenta o ortomosaico obtido com imagens capturadas pela aeronave em ambiente operacional na barragem de Fagilde. Como se pode observar, os resultados obtidos são bastante satisfatórios. Contudo, ainda existem aspetos a melhorar. É possível verificar na mesma figura que ainda existem pequenas imperfeições (descontinuidades em linhas retas) que necessitam ser melhoradas. Para isso estão a ser realizados mais testes com diferentes *datasets* de modo a melhorar o método apresentado e, conseqüentemente, o resultado obtido.



Figura 4 – Ortomosaico obtido com imagens capturadas pela aeronave em ambiente operacional na barragem de Fagilde

5. Conclusões

Foi apresentado o projeto "ELEVAR", os seus objetivos e as contribuições de cada um dos parceiros do consórcio. Descreveu-se a aeronave desenvolvida para este projeto assim como o sistema de sensores para navegação visual e algoritmos de navegação e de criação de ortomosaicos. Demonstraram-se as capacidades da aeronave com voos de ensaio realizados na barragem de Fagilde. Nesses mesmos voos foram capturadas múltiplas imagens das paredes da barragem, tendo-se também demonstrado a sua utilização na construção de ortomosaicos. Foram ainda adquiridos dados com o sistema de sensores para navegação, ainda que preliminarmente de forma manual (i.e., sem utilização da aeronave). Com estes dados demonstrou-se de forma qualitativa a eficácia dos algoritmos de navegação por visão.

Em trabalho futuro, serão realizados testes em laboratório para aferir quantitativamente a precisão do sistema de navegação visual. Os algoritmos de construção de mosaicos serão melhorados de forma eliminar algumas, pequenas, imperfeições ainda existentes. Será também feita a integração do sistema de sensores com a aeronave de forma a cooperar no controlo da mesma. O objetivo será evitar o choque da aeronave com obstáculos, nomeadamente com a própria estrutura que está a ser levantada.

Agradecimentos

O projeto ELEVAR – Estudo Localizado de Estruturas Verticais com Aeronaves Robotizadas é financiado pela Comissão da União Europeia, no âmbito do programa Portugal 2020, através do contrato de I&D em Co-Promoção com o número 17924 (ELEVAR).

Referências Bibliográficas

- Blösch, M.; Weiss, S.; Scaramuzza, D.; Siegwart, R. (2010). Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments. Em *Robotics and automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference, 21–28. IEEE.
- Brown, M.R.; Lowe, D.G. (2007). Automatic panoramic image stitching using invariant features. *International Journal of Computer Vision* 74(1), 59–73.
- Geiger, A.; Lenz, P.; Urtasun, R. (2012) Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. Em *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012 IEEE Conference, 3354–3361. IEEE.
- Maimone, M.; Cheng, Y.; Matthies, L. (2007). Two years of visual odometry on the Mars exploration rovers. *Journal of Field Robotics*, 24(3):169–186.
- Mur-Artal, R.; Tardós, J. (2017). ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5):1255–1262.
- Szeliski, R. (2006). Image alignment and stitching: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, vol. 2, Issue 1, 1–104. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1561/06000000009> .
- Triggs, B.; McLauchlan, P.F.; Hartley, R. I.; Fitzgibbon, A.W. (2000). Bundle adjustment - a modern synthesis. Em *Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice*, ser. ICCV '99. London, UK, Springer-Verlag, 298–372. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=646271.685629>