

INTEGRAÇÃO DE IMAGEM INFRAVERMELHA E VISUAL PARA VISTORIA DE EQUIPAMENTOS

FELIPE MENEGUITTI DIAS*, LEONARDO DE MELLO HONÓRIO*, ALEXANDRE CARVALHO†

*GRIN - Grupo de Robótica Inteligente
Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

†MRS Logística
Avenida Brasil, 2001 - Centro
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

Emails: felipe.dias@engenharia.ufjf.br, leonardo.honorio@ufjf.edu.br,
alexandre.carvalho@mrs.com.br

Abstract— In this work, computer vision techniques were used to build three-dimensional (3D) visual and thermal models of a small portion of a train track. To accomplish this, visual and thermal images were simultaneously captured, using cameras and the software LabVIEW. Then, VisualSfM was utilized to apply the Structure from Motion (SfM) technique to the visual images, which generated the visual 3D model. Afterwards, the 3D thermal model was obtained by using the geometric relationships between the thermal and visual cameras and reprojecting the 3D points on the thermal images. The results show that the developed system is capable of generating qualitatively satisfactory three-dimensional models, both in the visual and the infrared spectrum.

Keywords— Computer vision, Three-dimensional modeling, Equipment inspection.

Resumo— Neste trabalho, técnicas de visão computacional foram usadas para construir modelos tridimensionais (3D) visuais e térmicos de um pequeno trecho de uma linha de trem. Para efetuar essa tarefa, imagens visuais e térmicas foram capturadas simultaneamente, usando câmeras e o software LabVIEW. Em seguida, o VisualSfM foi utilizado para aplicar a técnica *Structure from Motion* (SfM) nas imagens visuais para gerar o modelo 3D visual. Posteriormente, o modelo 3D térmico foi obtido usando a relação geométrica que existe entre as câmeras térmica e visual, e reprojando os pontos 3D nas imagens térmicas. Os resultados mostram que o sistema desenvolvido é capaz de gerar modelos tridimensionais qualitativamente satisfatórios tanto no espectro visual quanto no infravermelho.

Palavras-chave— Visão computacional, Modelagem tridimensional, Inspeção de equipamentos.

1 Introdução

A produção da maioria dos produtos na economia atual requer um investimento de capital significativo. Equipamentos em mau funcionamento ou não funcionais podem aumentar consideravelmente os gastos, diminuindo a capacidade da empresa para competir no mercado. Para um modelo de negócio produtivo, é primordial a capacidade desses investimentos de capital serem executados de forma rápida e efetiva.

A inspeção manual de equipamentos é tradicionalmente realizada por humanos treinados para detectar qualquer avaria no equipamento. Entretanto, a inspeção manual possui diversas desvantagens. Entre elas, estão o custo elevado, o tempo excessivo, o perigo e a falha humana na detecção dos problemas. A automação do processo de inspeção possibilitaria reduzir esses problemas, além de permitir a criação de um banco de dados contendo a evolução do estado dos equipamentos com o tempo.

Com o crescente aumento da capacidade de processamento dos computadores, a utilização de técnicas de visão computacional tornou-se cada vez mais rápida e barata. Existem diferentes estu-

dos que utilizam essas técnicas na detecção de defeitos em equipamentos. Em Nikolic et al. (2013), é utilizado um *drone* equipado com duas câmeras para realizar a reconstrução tridimensional de uma instalação industrial para futura inspeção. Em Varadharajan et al. (2014), é utilizado um sistema de processamento de imagem para a detecção de defeitos em ruas asfaltadas baseado em informações de cor e textura. Já em Karakose et al. (2017), é colocada uma câmera na parte superior de um trem em funcionamento e é aplicado às imagens obtidas um processamento de imagem capaz de verificar a distância entre os trilhos. Avarias detectadas pela medição, em qualquer ponto do trajeto, são analisadas e a partir delas é possível detectar falhas como, por exemplo, a expansão do trilho.

As imagens térmicas possuem informações que não podem ser obtidas a olho nu. Aliadas às informações contidas nas imagens visuais, elas podem melhorar o processo de inspeção. Pode-se listar alguns estudos que utilizaram imagens térmicas com o objetivo de inspeção de equipamentos. Em Larrauri et al. (2013), foi utilizado um drone para a detecção de pontos com má condutividade e *hotspots*. Em Taheri-Garavand

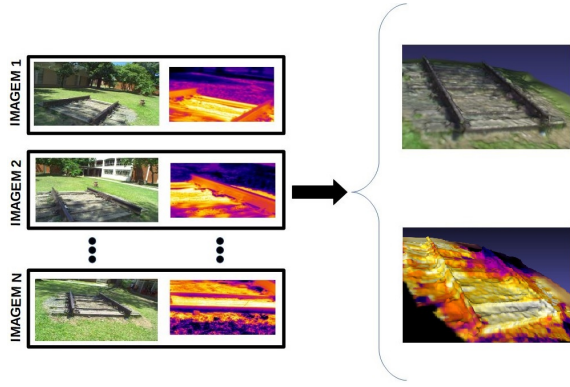


Figura 1: Diagrama com as entradas e as saídas do sistema proposto.

et al. (2015), imagens térmicas foram utilizadas para classificar, através de redes neurais artificiais, diferentes defeitos em um radiador. Em Chen et al. (2017), foi desenvolvido um método para a combinação das informações da imagem visual e térmica, com o objetivo de inspecionar equipamentos elétricos utilizando robôs.

O sistema proposto neste trabalho consiste na utilização de duas câmeras, uma visual e uma térmica, que irão capturar, simultaneamente, o equipamento a ser inspecionado. As imagens visuais serão utilizadas para a construção de um modelo tridimensional do equipamento através de uma técnica de visão computacional conhecida como *Structure from Motion* (Longuet-Higgins, 1981). A partir do modelo tridimensional visual obtido, será gerado um modelo tridimensional térmico re-projetando os pontos tridimensionais nas imagens térmicas. Esses dois modelos poderão ser utilizados para a detecção de falhas tanto por um operador humano qualificado quanto por um sistema de detecção de falhas automatizado.

2 Metodologia

A metodologia proposta nesse trabalho pode ser dividida em cinco etapas. Para utilizar as câmeras visuais e térmicas, é necessário, inicialmente, a calibração delas. Em seguida, é necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição simultânea das imagens visuais e térmicas. Após essa etapa, prossegue-se para a geração do modelo tridimensional visual. E a partir disso, já é possível definir as relações geométricas rotação ($\mathbf{R}$) e translação ($\mathbf{t}$) entre a câmera visual e a térmica. Finaliza-se com a geração do modelo tridimensional térmico. É apresentado na figura 1 as entradas e as saídas do sistema proposto.

2.1 Calibração das câmeras

O processo de calibração das câmeras consiste em encontrar os parâmetros necessários para o mapeamento de pontos no espaço tridimensional para

pontos em um plano imagem. Existem dois tipos de parâmetros: os parâmetros intrínsecos, que incorporam as características da lente da câmera, e os parâmetros extrínsecos, que incorporam a pose da câmera em relação a algum referencial.

Sendo $\mathbf{X} = [X \ Y \ 1]^T$ um ponto no espaço 3D e $\mathbf{x} = [x \ y \ 1]^T$ um ponto no plano imagem. O mapeamento, utilizando o modelo *pinhole*, pode ser escrito pela equação 1.

$$\alpha \mathbf{x} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{X} \quad (1)$$

Sendo:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde $\mathbf{K}$ é a matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera, f_x e f_y correspondem às distâncias focais da câmera, x_0 e y_0 representam o ponto principal, s corresponde à inclinação entre os eixos no plano imagem e α é uma escala arbitrária.

Calibrar a câmera é o processo de encontrar os parâmetros das matrizes $\mathbf{K}$ e $\mathbf{R}$, e do vetor $\mathbf{t}$. Tradicionalmente, para realizar esse processo, é utilizado um tabuleiro de xadrez com tamanho dos quadrados conhecidos. Existem ferramentas disponíveis para realizar o processo de calibração, entre elas pode-se citar a *toolbox* de calibração do MATLAB, (Bouguet, 2002), que foi utilizada neste trabalho, e a *toolbox* do OpenCV (Bradski et al., 2005).

A calibração da câmera térmica apresenta desafios maiores em comparação com a câmera visual. A câmera térmica, ao ser apontada para um tabuleiro de xadrez convencional, não obtém imagens com contraste suficiente para que as *toolboxes* de calibração possam encontrar o padrão requerido. Dessa forma, algumas alternativas ao tabuleiro de xadrez convencional foram propostas em diferentes estudos.

Em Ng et al. (2005), foi construída uma matriz de fios que era aquecida para a realizar a calibração. Em Hilsenstein (2005), um tabuleiro foi construído utilizando-se de uma placa de circuito impresso (PCI) e possibilitando que esse seja constituído de dois materiais diferentes, consequentemente, possuindo emissividades diferentes. Em Prakash et al. (2006), utilizou-se de uma lâmpada halógena direcionada ao tabuleiro de forma a aquecer mais os quadrados pretos do que os brancos. Em Vidas et al. (2012), construiu-se um tabuleiro de papelão com alguns quadrados vazados e foi inserida uma fonte de calor atrás desse tabuleiro. Em Kim et al. (2015), foi construída uma matriz de linhas construídas em uma PCI que podem ser aquecidas para realizar a calibração. O sistema que apresenta os melhores resultados é apresentado em Ellmauthaler et al. (2013),



Figura 2: Configuração utilizada para realizar a calibração da câmera térmica.

em que é construída uma matriz 9 x 9 de lâmpadas em miniatura e é desenvolvido um algoritmo para a detecção dos pontos da lâmpada tanto por câmeras visuais quanto térmicas

Optou-se nesse trabalho, por simplicidade, por utilizar uma lâmpada incandescente direcionada a um tabuleiro de xadrez. Esse será colocado sobre uma cerâmica de forma a manter o calor por mais tempo. Mesma abordagem utilizada em Saponaro et al. (2015).

É apresentado na figura 2 o sistema utilizado para a calibração da câmera térmica. E as figuras 3 e 4 mostram as imagens de calibração obtidas para a câmera visual e térmica, respectivamente.

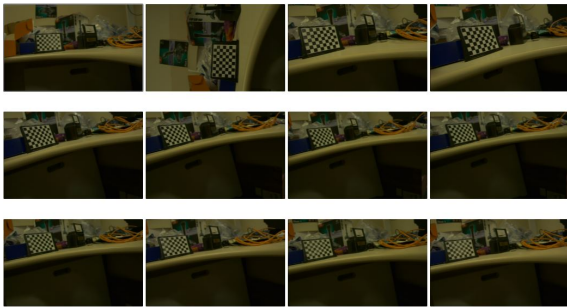


Figura 3: Amostra das imagens utilizadas para realizar a calibração da câmera visual.

2.2 Aquisição das imagens

As câmeras utilizadas para realizar a aquisição das imagens foram os modelos Basler acA1920-40uc (câmera visual) e FLIR A65 (câmera térmica). O *software* utilizado para realizar a aquisição das imagens foi o LabVIEW. Nesse, foi implementado um *trigger* por *software* de forma a obter uma sincronia entre as imagens capturadas.

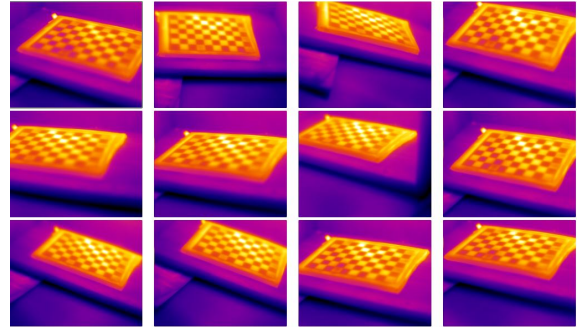


Figura 4: Amostra das imagens utilizadas para realizar a calibração da câmera térmica.

2.3 Modelo tridimensional visual

De forma a gerar o modelo tridimensional visual, foi utilizada a técnica *Structure from Motion* (SfM) com auxílio do *software* VisualSFM (Wu, 2013), que gera a nuvem de pontos esparsa do objeto. Para gerar a nuvem de pontos densa, foi utilizada a ferramenta PMVS/CMVS (Furukawa and Ponce, 2010; Furukawa et al., 2010).

2.4 Posição relativa entre as câmeras

O VisualSFM oferece como saída a nuvem de pontos tridimensionais e a posição relativa da câmera visual para cada imagem obtida. De forma a obter o modelo tridimensional térmico, é necessário calcular as matrizes de posição relativa da câmera térmica. Para tal, o seguinte procedimento foi adotado:

- Escolhe-se um par de imagens, visual e térmica, adquiridas simultaneamente;
- Nesse par de imagens, escolhe-se um conjunto de pontos ($n > 4$) na imagem visual que correspondam a pontos da imagem térmica (figura 5);
- Procura-se, na nuvem de pontos, um ponto cujo erro de projeção no ponto escolhido da imagem visual seja o menor possível. Esse ponto tridimensional corresponderá tanto ao ponto da imagem visual quanto ao ponto da imagem térmica.
- Encontra-se a matriz de rotação ($\mathbf{R}_{\text{termica}}$) e o vetor translação ($\mathbf{t}_{\text{termica}}$) através do algoritmo solvePnP (Gao et al., 2003);
- Calculam-se as matrizes de rotação e translação relativa através das equações 3 e 4.

$$\mathbf{R}_{\text{relativa}} = \mathbf{R}_{\text{visual}}^{-1} \mathbf{R}_{\text{termica}} \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_{\text{relativa}} = \mathbf{C}_{\text{termica}} - \mathbf{C}_{\text{visual}} \quad (4)$$

Sendo que $\mathbf{t} = -\mathbf{R}\mathbf{c}$

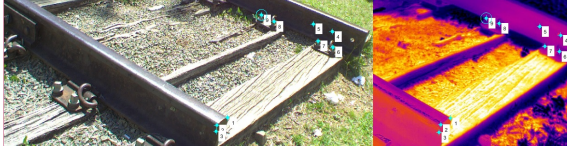


Figura 5: Escolhendo pontos correspondentes entre a imagem visual e térmica obtidas de forma simultânea.

2.5 Modelo tridimensional térmico

Para gerar o modelo tridimensional térmico, é necessário reprojeter todos os pontos da nuvem de pontos obtida pelo VisualSfM nas imagens térmicas. Isso é feito através da equação 1. A matriz de calibração da câmera térmica, $\mathbf{K}_{\text{termica}}$, é obtida conforme descrito em 2.1, a matriz $\mathbf{R}_{\text{termica}}$ e o vetor $\mathbf{t}_{\text{termica}}$ são obtidos utilizando as equações 5 e 6.

$$\mathbf{R}_{\text{termica}} = \mathbf{R}_{\text{visual}}\mathbf{R}_{\text{relativa}} \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_{\text{termica}} = \mathbf{C}_{\text{visual}} + \mathbf{C}_{\text{relativa}} \quad (6)$$

Sendo que $\mathbf{C}_{\text{relativa}}$ e $\mathbf{R}_{\text{relativa}}$ foram obtidas utilizando o procedimento descrito em 2.4. A matriz $\mathbf{R}_{\text{visual}}$ e o vetor $\mathbf{C}_{\text{visual}}$ são diferentes para cada imagem visual adquirida e são obtidas através do VisualSfM.

Um ponto no espaço pode possuir pontos projetados em diversas imagens térmicas. Assim, esse pode possuir diferentes valores para a intensidade de temperatura. Duas alternativas foram analisadas para a decisão de qual valor de intensidade de temperatura será associado ao ponto no espaço:

- Usar a média das intensidades projetadas;
- Usar o valor máximo das intensidades projetadas.

3 Resultados

Para teste de conceito do sistema desenvolvido, foi utilizado um segmento de trilho como objeto a ser modelado, mostrado na figura 6.



Figura 6: Segmento de trilho de trem que será modelado pelo sistema.

De forma a realizar a reconstrução tridimensional visual do objeto, utilizando a técnica *Structure from Motion* (SfM), foram adquiridas diversas imagens em diversos ângulos do segmento de trilho, totalizando 60 imagens. Uma amostra das imagens utilizadas é mostrada na figura 7.

Para cada imagem visual adquirida, uma imagem térmica síncrona a essa também é adquirida. Uma amostra dessas imagens pode ser vista na figura 8.

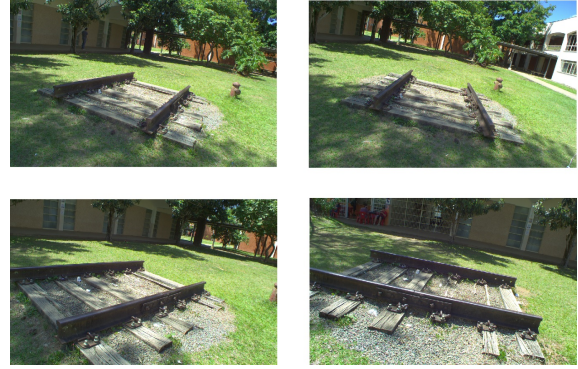


Figura 7: Amostra das imagens capturadas pela câmera visual.

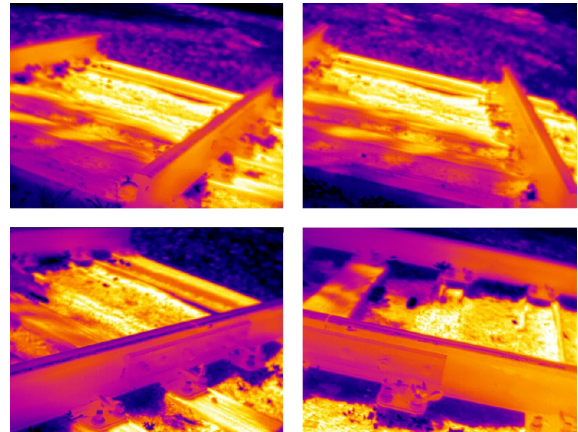


Figura 8: Amostra das imagens capturadas pela câmera térmica.

Após a utilização do *software* VisualSfM, juntamente à ferramenta PMVS/CMVS para gerar o modelo tridimensional visual, utilizam-se alguns filtros no *software* Meshlab para a geração de um modelo tridimensional texturizado do objeto. É apresentado na figura 9 a nuvem de pontos densa obtida pelo VisualSfM e na figura 10 mostra-se o modelo tridimensional visual após o processo de texturização.

Após o cálculo da posição relativa entre a câmera visual e térmica, conforme descrito em 2.4, gera-se o modelo térmico através do processo descrito em 2.5. Os modelos térmicos, após a aplicação de alguns filtros do Meshlab utilizando os valores médios e máximos de reprojeção, são apresentados nas figuras 11 e 12.

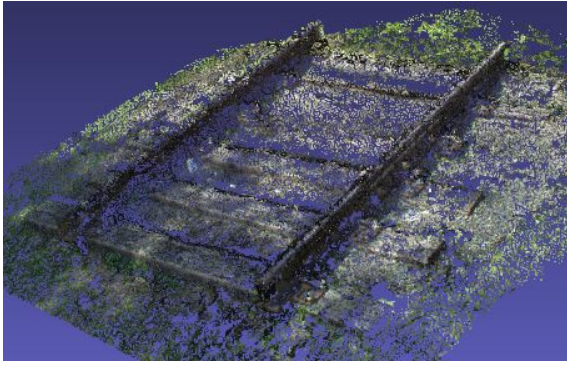


Figura 9: Nuvem de pontos densa obtida utilizando o VisualSFM.

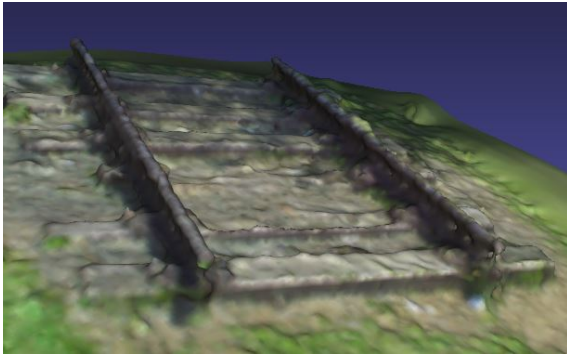


Figura 10: Modelo tridimensional visual após aplicação de filtros no MeshLab.

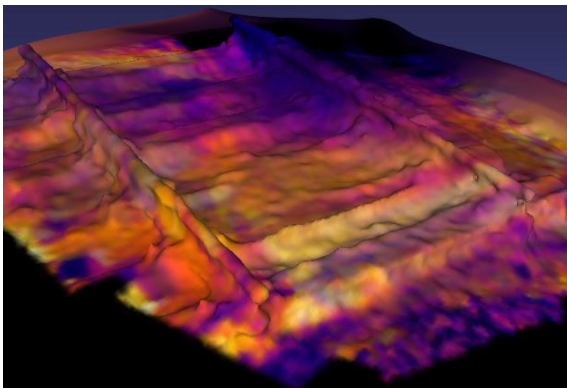


Figura 11: Modelo tridimensional térmico utilizando a média das intensidades projetadas.

Assim, é possível observar que, utilizando-se a máxima das intensidades projetadas para construir o modelo tridimensional térmico, resulta em um modelo mais fidedigno às imagens obtidas. A utilização de valores máximos evita problemas causados, por exemplo, por sombreamento.

4 Conclusões

Nesse trabalho, foi desenvolvido um sistema que, a partir de um conjunto de imagens obtidas através de uma câmera visual e uma térmica, é capaz de gerar dois modelos tridimensionais: visual e térmico. Observando, qualitativamente, os dois

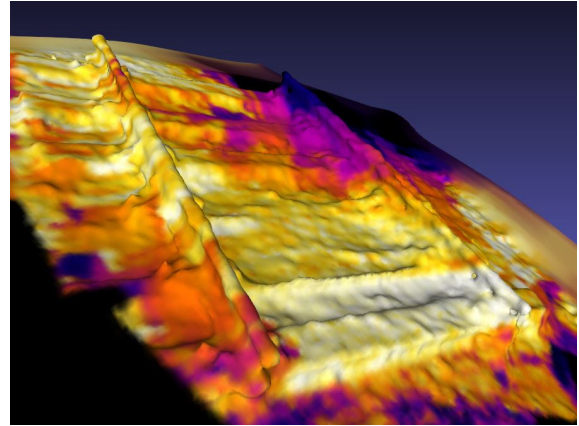


Figura 12: Modelo tridimensional térmico utilizando o máximo das intensidades projetadas.

modelos, pode-se verificar uma boa semelhança desses com as imagens capturadas pelas câmeras, mostrando que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Há diferentes estudos que utilizam das informações visuais e térmicas para detecção de falhas em equipamentos e estruturas, listados na introdução desse texto. Porém, não há, até onde sabem os autores, estudos que utilizem modelos tridimensionais visuais e térmicos de objetos para realização de inspeção. A abordagem utilizada nesse trabalho pode ser generalizada para diversos tipos de equipamentos e pode ser integrada a um sistema de inspeção automatizado.

A utilização de um sistema *stereo* de câmeras visuais, acoplada à câmera térmica possibilitaria a recuperação da escala do objeto a ser inspecionado, possibilitando a medida de objetos e defeitos. Além disso, o uso de um sistema de calibração mais eficiente, que apresente um alto contraste nas imagens, permitiria que tanto a câmera visual quanto a térmica possam ser calibradas ao mesmo tempo. Dessa forma, a etapa descrita na seção 2.4 poderia ser descartada e o modelo térmico possuiria qualidade superior.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a MRS logística e ao INERGE.

Referências

- Bouguet, J.-Y. (2002). Camera calibration toolbox for matlab, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- Bradski, G., Kaehler, A. and Pisarevsky, V. (2005). Learning-based computer vision with intel's open source computer vision library., *Intel Technology Journal* **9**(2).

- Chen, Y., Dai, J., Mao, X., Liu, Y. and Jiang, X. (2017). Image registration between visible and infrared images for electrical equipment inspection robots based on quadrilateral features, *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, pp. 126–130.
- Ellmauthaler, A., da Silva, E. A., Pagliari, C. L., Gois, J. N. and Neves, S. R. (2013). A novel iterative calibration approach for thermal infrared cameras, *Image Processing (ICIP), 2013 20th IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 2182–2186.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M. and Szeliski, R. (2010). Towards internet-scale multi-view stereo, *CVPR*.
- Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **32**(8): 1362–1376.
- Gao, X.-S., Hou, X.-R., Tang, J. and Cheng, H.-F. (2003). Complete solution classification for the perspective-three-point problem, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* **25**(8): 930–943.
- Hilsenstein, V. (2005). Surface reconstruction of water waves using thermographic stereo imaging, *Image and Vision Computing New Zealand*, Vol. 2.
- Karakose, M., Yaman, O., Baygin, M., Murat, K. and Akin, E. (2017). A new computer vision based method for rail track detection and fault diagnosis in railways, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* **6**(1): 22–17.
- Kim, N., Choi, Y., Hwang, S., Park, K., Yoon, J. S. and Kweon, I. S. (2015). Geometrical calibration of multispectral calibration, *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2015 12th International Conference on*, IEEE, pp. 384–385.
- Larrauri, J. I., Sorrosal, G. and González, M. (2013). Automatic system for overhead power line inspection using an unmanned aerial vehicle—relifo project, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*, IEEE, pp. 244–252.
- Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections, *Nature* **293**(5828): 133.
- Ng, H., Du, R. et al. (2005). Acquisition of 3d surface temperature distribution of a car body, *Information Acquisition, 2005 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 5–pp.
- Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C. and Siegwart, R. (2013). A uav system for inspection of industrial facilities, *Aerospace Conference, 2013 IEEE*, IEEE, pp. 1–8.
- Prakash, S., Lee, P. Y., Caelli, T. and Raupach, T. (2006). Robust thermal camera calibration and 3d mapping of object surface temperatures, *SPIE Proceedings: ThermoSense XXVIII* **6205**: 62050J.
- Saponaro, P., Sorensen, S., Rhein, S. and Kambhamettu, C. (2015). Improving calibration of thermal stereo cameras using heated calibration board, *Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 4718–4722.
- Taheri-Garavand, A., Ahmadi, H., Omid, M., Mohtasebi, S. S., Mollazade, K., Smith, A. J. R. and Carlomagno, G. M. (2015). An intelligent approach for cooling radiator fault diagnosis based on infrared thermal image processing technique, *Applied Thermal Engineering* **87**: 434–443.
- Varadharajan, S., Jose, S., Sharma, K., Wander, L. and Mertz, C. (2014). Vision for road inspection, *Applications of Computer Vision (WACV), 2014 IEEE Winter Conference on*, IEEE, pp. 115–122.
- Vidas, S., Lakemond, R., Denman, S., Fookes, C., Sridharan, S. and Wark, T. (2012). A mask-based approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **61**(6): 1625–1635.
- Wu, C. (2013). Towards linear-time incremental structure from motion, *3DTV-Conference, 2013 International Conference on*, IEEE, pp. 127–134.