

Relatório Final de Apreciação do Programa de Bolsa a elaborar pelo Bolseiro

Ex.mo Senhor Vice-Reitor
Professor Doutor Artur Silva
Reitoria da Universidade de Aveiro

Bernardo Miguel Martins Lourenço, com o processo n.º FA_02_2017_011, titular do Documento de Identificação n.º 144026082, Mestre em Engenharia Mecânica, vem, de acordo com a alínea f) do artigo 12.º do Estatuto do Bolseiro de Investigação, aprovado pela Lei n.º 40/2004, de 18 de agosto, com as alterações do Decreto-Lei n.º 123/2019, de 28 de agosto, apresentar a V. Ex.ª o devido Relatório Final referente à Bolsa de Investigação, na área de Engenharia Mecânica, cujos trabalhos foram desenvolvidos no (a) Laboratório de Automação e Robótica da Universidade de Aveiro e na (b) Composite Solutions, Lda., e tendo sido coordenada pelo Ex.mo Senhor Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos.

Apresentação do objeto da Bolsa e dos respetivos objetivos.

A bolsa de investigação, com o nome de “Sistema de Enrolamento Filamentar Assistido por Braço Robótico e Visão com Inteligência Artificial”, teve como objetivo o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização, por visão artificial, de um processo de enrolamento filamentar.

Durante o período da bolsa, é de notar que, por motivos externos, o processo de enrolamento filamentar foi descontinuado por parte da empresa e, de forma a que pudesse haver uma continuação dos trabalhos, e em concordância com a empresa, decidiu-se mudar o processo em foco para a infusão de fibra. Este processo tem necessidades semelhantes do ponto de vista técnico e não requer grandes alterações no trabalho previamente desenvolvido.

O sistema de monitorização, especialmente para processos industriais com baixa cadência, alto custo e grande variabilidade durante produção, como é neste caso, representa inúmeras vantagens e um grande valor, pelas razões apresentadas de seguida.

1. O sistema de monitorização pode garantir um primeiro controlo de qualidade automático por análise de variáveis durante o processo, por exemplo, a temperatura ou a velocidade de deposição na peça. Os dados adquiridos podem inclusivamente ser fornecidas ao cliente com a peça, para validação e transparência do processo.
2. Os dados monitorizados oferecem uma percepção avançada e analítica em tempo real, que pode ser utilizado pelos técnicos *in situ* para avaliação e correção do processo. Como ilustração, um dos desafios do processo de infusão de fibra é a detecção de *hotspots* (pontos de subida de temperatura busca na peça) durante um dos estágios do processo. Sem o sistema de monitorização, é necessário a inspeção periódica de vários pontos da peça com um termómetro de infravermelhos. Com o sistema de monitorização desenvolvido, a totalidade da peça é monitorizada por uma câmara térmica, e qualquer *hotspot* pode ser detectado em segundos e sem intervenção humana.



3. Os dados adquiridos podem ser utilizados à posteriori para analisar o impacto de melhorias ou alterações do processo de fabrico, assim como investigar casos de peças que não cumpram as especificações ou casos de falhas catastróficas durante o processo.

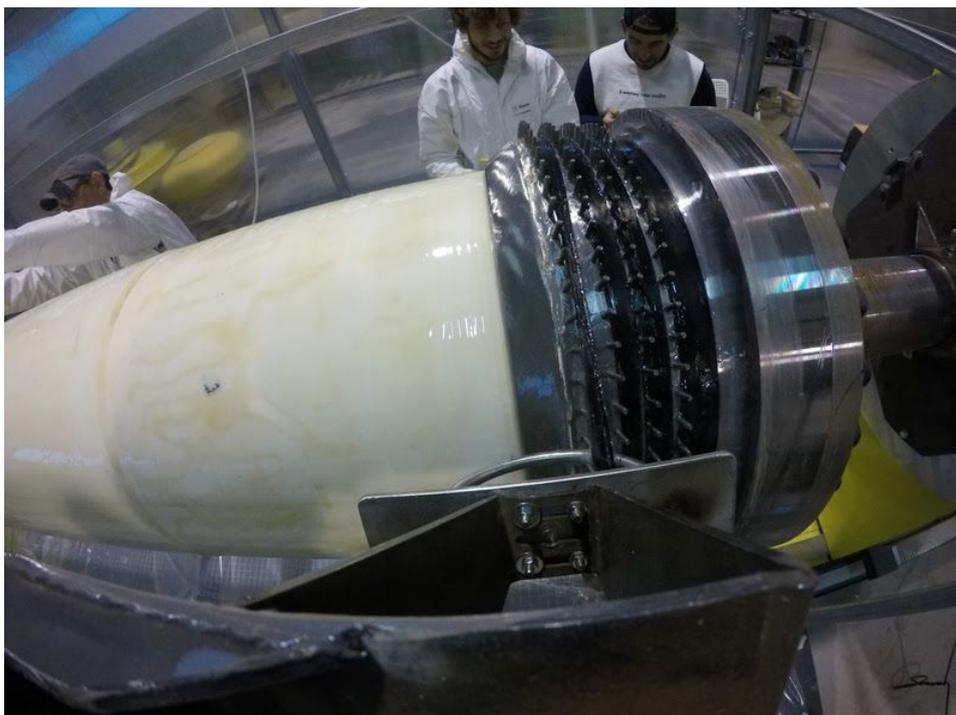
De forma a cumprir as expectativas, o presente trabalho teve como objectivos principais:

1. A escolha de um sistema de visão de acordo com os requisitos necessários para a captura da peça a ser produzida. Isto inclui a câmara, lentes, iluminação artificial, software e outro equipamento auxiliar.
2. Montagem e gestão de uma unidade computacional dedicada para o processamento dos dados adquiridos e treino de modelos de *Deep Learning* para processamento de dados.
3. Desenvolvimento de software para processamento das imagens e extração de dados relevantes ao processo, como por exemplo, a temperatura do molde, ou a velocidade da resina durante a infusão. Estes algoritmos têm como base métodos de processamento de imagens por *Deep Learning*.
4. Desenvolvimento do software para visualização do processo, de forma a facilitar o acesso e análise de dados por parte dos técnicos da empresa.

Identificação cronológica dos trabalhos desenvolvidos no âmbito da Bolsa.

Desenvolvimento da solução de visão artificial para o enrolamento de fibra

Inicialmente, várias visitas à unidade fabril na zona industrial de Vagos por foram realizadas, de forma a entender o problema, e neste contexto foram adquiridos vários vídeos e fotografias. Em conclusão, percebeu-se que a solução a desenvolver seria capturar o movimento exato dos movimentos do braço robótico e imagens da zona de deposição da fibra, como pode ser visto na figura seguinte.



Esta configuração permitiria melhorar o processo de enrolamento, por possibilitar uma monitorização e possível ajuste por captura exata do ponto de deposição da fibra. Este ponto pode apenas ser estimado durante a programação do programa CAM que é executado pelo braço robótico. O ponto real depende de vários fatores, como por exemplo a tensão do fio de fibra, a distância do braço à peça e a velocidade de avanço do braço robótico.

Assim, de acordo com o sistema proposto, foi adquirido o sistema de visão industrial composto por uma câmara monocromática Mako G-319B e uma ótica de 12mm, em conjunto com todos os acessórios necessários. Esta câmara foi escolhida pelas características técnicas, como por exemplo uma resolução 2064 x 1544 e por ser compatível com o software ROS, utilizado para a captura da sequência das imagens. Foi pedido de seguida à *Composite Solutions* para desenvolver um suporte para o braço robótico para fixar a câmara neste, e de procurar, em conjunto com o fornecedor do robot, uma solução para ler as coordenadas do *end-effector* do robot em tempo real, para posicionar a câmara nas coordenadas do espaço de trabalho. Em paralelo, o bolseiro desenvolveu o software para realizar a aquisição das imagens e a sua serialização. Além disso, a calibração intrínseca e extrínseca também foi realizada.

Infelizmente, a empresa não desenvolveu o suporte para a câmara, e assim decidiu-se utilizar uma solução sub-ótima de colocar a câmara num suporte fixo acima do robot, de forma a ter uma perspectiva em *bird's eye view*.

Construção, instalação e manutenção de uma unidade computacional de Deep Learning

O processamento de imagens que é requerido neste trabalho exige um poder de computação alto. Devido a esta necessidade, foi adquirido um computador para o projeto, que tem como característica especial as quatro gráficas de alta performance, que permitem acelerar os algoritmos de visão por computador usados. Como estes computadores com esta capacidade não estão disponíveis no mercado, o computador foi adquirido peça-a-peça e foi posteriormente montado no laboratório.

Depois de completo este passo, foi instalado o sistema operacional e todo o software necessário, e foi desenvolvido um guia para instruir e normalizar a forma de acesso e utilização do computador. Este guia está disponível em <https://lardemua.github.io/deep/>, e além de instruções de utilização contém todos os passos necessários para replicar todo de instalação e configuração do computador.

Após a configuração do computador, foram realizados três workshops com outros membros do LAR e membros do IRIS lab, de forma a partilhar metodologias e conhecimento, e discutir e testar o workflow de utilização da máquina. Estes workshops foram um sucesso e contribuíram largamente para determinar a forma de utilização da máquina, que perdurou durante todo o projeto sem nenhuns problemas.

Desenvolvimento da solução para processo de infusão de fibra

Como referido anteriormente, o processo de enrolamento de fibra foi descontinuado pela *Composite Solutions*, antes de qualquer solução ser desenvolvida e testada. Não havendo outra

solução, o processo foi substituído por um processo de parecidos desafios, e na qual poderíamos utilizar o hardware e software já adquirido e desenvolvido.

Em primeiro, e tal como no processo anterior, começou-se por visitar a empresa aquando das infusões de forma a entender quais os requisitos, recolher imagens e procurar definir a solução a apresentar. A solução, em discussão com a empresa, foi definida como a captura de imagens da infusão, segmentação da zona de infusão e posteriormente o registo desta zona no modelo CAD da peça a ser produzida, e por último um software de visualização dos resultados. Estes três sub-desafios permitem a monitorização do processo total e ainda capturar as variáveis relevantes do processo, como por exemplo a velocidade de infusão e a frente da infusão.

Assim, foi implementado software para cada um dos passos. Em particular:

1. A captura das imagens da infusão, já implementada no processo de enrolamento, foi melhorada de forma a melhor capturar a peça mesmo com mudanças de iluminação, que eram comuns e dificultavam o processo de segmentação.
2. O registo da peça no molde tridimensional era executado por corresponder *keypoints* no modelo virtual a pontos na imagem. Este processo, embora funcional, necessitava de que a peça contivesse marcadores, de forma a melhorar a precisão deste registo.
3. A segmentação da zona de infusão foi desenvolvida através de algoritmos clássicos, que teve uma performance um pouco aquém, o que é expectável por haver demasiada variabilidade no processo de infusão, por não haver nenhum controlo da iluminação, e por o sistema de visão não estar num suporte que permitisse reduzir as oclusões causadas por técnicos e equipamento. Se ambos problemas fossem resolvidos, este algoritmo teria um desempenho muito superior. Outra solução seria desenvolver um algoritmo baseado em deep learning, que permite obter um resultado superior mesmo em condições adversas. No entanto, este algoritmo requer uma captura e *labeling* de uma quantidade de dados larga, que não foi possível obter inicialmente.
4. Após obter a segmentação, esta é incluída no modelo tridimensional, num formato que pode ser visualizado posteriormente no software *ParaView*.

Desenvolvimento e treino de modelos de segmentação semântica

Um dos pontos fulcrais na solução proposta anteriormente é o algoritmo de segmentação semântica, que deteta a zona de infusão. A melhoria deste algoritmo é fundamental para obter dados que possam ser utilizados posteriormente.

A solução para a melhoria é o desenvolvimento de um algoritmo baseado em Deep Learning. No entanto, o desenvolvimento deste algoritmo não é trivial:

1. Os algoritmos de deep learning são uma disciplina moderna que requer profundo conhecimento técnico. Embora haja imenso potencial, não é fácil de obter, e os erros são difíceis de identificar, ao contrário de algoritmos mais tradicionais.
2. São necessárias quantidades relevantes de dados obtidos e classificados para alimentar o treino que qualquer modelo, para que tenha desempenho para um espectro de condições.

Como a quantidade de dados são limitados, e a cadência desse processo é bastante baixa, decidiu-se estudar a viabilidade dos algoritmos de segmentação num desafio igualmente difícil: a condução autónoma, para extrair a área da estrada de imagens capturadas por uma câmara colocada no cockpit do carro. Este desafio é justificado pela presença de uma projeto do LAR - o atlascar - ligado à condução autónoma, e por um carro, de forma a implementar o algoritmo e estudar quais os desafios/dificuldades neste sistema.

Apresentação dos resultados alcançados.

Neste projeto foram alcançados com sucesso os seguintes objectivos:

1. Tanto o hardware adquirido e o software desenvolvido estão adequados para a captura de dados de ambos processos - enrolamento e infusão de fibra. O sistema em questão foi desenvolvido na framework ROS, o que permite uma flexibilidade e escala para sucessivas melhorias.
2. A unidade computacional dedicada ao projeto atingiu as expectativas e é uma mais-valia para qualquer projeto de Deep Learning que necessite alta capacidade de computação. Durante o decorrer da bolsa presente, inúmeros problemas e desafios foram resolvidos com sucesso, e anotados num guia que serve utilizadores, tanto os administradores, como novos utilizadores que queiram aceder à capacidade computacional da máquina. Este legado é de alta importância para futuros trabalhos no laboratório de Automação e Robótica.
3. Um protótipo de um sistema funcional foi apresentado, no qual cada passo importante para o processo foi definido e implementado, ainda que com desempenho aquém para uma utilização definitiva. Um dos aspectos de relevância neste protótipo é que cada componente pode ser desenvolvido no futuro em separado, de forma a melhorar o desempenho do sistema no seu total. Ainda que não desenvolvidas, foram propostas à Composite Solutions alterações no processo de produção que, se implementadas, potenciará alterações nos algoritmos propostos que permitiriam uma melhoria substancial, como por exemplo, mas não só, a melhoria da iluminação na unidade fabril, a colocação de alvos visuais nos modelos para um registo robusto e preciso, e a colocação de um suporte definitivo e estático para o sistema de visão.
4. Durante o período deste trabalho, foram desenvolvidos trabalhos relacionados com um dos componentes da solução proposta - a segmentação semântica e deep learning - que foram publicados em revistas internacionais e foram apresentados em conferências internacionais:
 - a. B. Lourenço, V. Santos, M. Oliveira and T. Almeida, "Performance Analysis on Deep Learning Semantic Segmentation with multivariate Training Procedures," 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Ponta Delgada, Portugal, 2020, pp. 89-95
 - b. Almeida T., Santos V., Lourenço B. (2020) Scalable ROS-Based Architecture to Merge Multi-source Lane Detection Algorithms. In: Silva M., Luís Lima J., Reis L., Sanfeliu A., Tardioli D. (eds) Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2019.
 - c. T. Almeida, V. Santos, B. Lourenço and P. Fonseca, "Detection of Data Matrix Encoded Landmarks in Unstructured Environments using Deep Learning," 2020



IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Ponta Delgada, Portugal, 2020, pp. 74-80

Auto-avaliação do Bolseiro.

Os objetivos do projeto foram cumpridos. No entanto, haveria a possibilidade de atingir um melhor resultado, fosse a Composite Solutions mais coordenada, mais organizada e mais comunicativa com os bolseiros. A possibilidade de implementar um algoritmo de segmentação de imagem no contexto da infusão poderia ter sido uma realidade, se se pudesse garantir que o processo fosse sempre realizado da mesma forma, e se houvessem infusões regulares, para que a quantidade de dados capturados fosse suficiente para treinar os modelos de Deep Learning. Em conclusão, a equipa de bolseiros de investigação fez tudo o que era possível, com as condições apresentadas pela *Composite Solutions*.

Universidade de Aveiro, 10 de Outubro de 2020
