

Reconhecimento de cordões de solda para a inspeção automatizada de cordões de solda.

Vinicius de Vargas Terres¹, André Schneider de Oliveira²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida 7 de Setembro 3165, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil

vinciusterres@alunos.utfpr.edu.br, andreoliveira@utfpr.edu.br

Abstract. *Automating the inspection of weld seams is one option for improving the maintenance of separator vessels. Positioning during inspection is a challenge for inspection robots. This paper presents a solution for weld bead recognition for weld bead tracking. An algorithm is proposed to provide reliable bead detection from the center position. A technique for weld bead tracking was developed, mitigating the impact of gravity on the system. At the end of the navigated section, an algorithm leads the robot back to a new section of the weld bead. The proposals were implemented on the CRAS robot. The tests show that the robot identified and followed the seam with a maximum error of 2.86 mm.*

Keywords: *Weld bead recognition, Autonomous inspection robot, Weld bead tracking, Line profile sensor*

Resumo. *A automatização da inspeção de cordões de solda é uma opção para a melhoria da manutenção dos vasos separadores. O posicionamento durante a inspeção é um desafio para os robôs de inspeção. Esse trabalho apresenta uma solução para o reconhecimento de cordões de solda visando o seu seguimento. Um algoritmo é proposto para fornecer uma detecção confiável do cordão a partir da posição do centro. Uma técnica para o seguimento de cordão de solda foi desenvolvida, atenuando o impacto da gravidade sobre o sistema. Ao final do trecho navegado, um algoritmo reconduz o robô para um novo trecho do cordão. As propostas foram implementadas no robô CRAS. Os testes mostram que o robô identificou e seguiu o cordão com um erro máximo de 2,86 mm.*

Palavras chave: *Reconhecimento de cordões de solda, Robô autônomo de inspeção, Seguimento de cordão de solda, Sensor de perfil*

Esse trabalho é um resumo da dissertação: "Reconhecimento de cordões de solda para a inspeção automatizada de vasos separadores" apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no dia 26 de outubro de 2022. A dissertação pode ser acessada em: <https://shre.ink/1KrX>. Esse trabalho foi contribuição direta para um congresso [Terres et al. 2019]. Contribuições secundárias deste trabalho estão presentes em um congresso [Palar et al. 2019], um capítulo de livro [Dalmedico et al. 2019] e uma revista internacional [Palar et al. 2020]. O resultado deste trabalho encontra-se submetido na revista IEEE Robotics and Autonomous Letters [em avaliação]. Contribuições secundárias encontram-se submetidas na revista Robotics and Autonomous Systems [em avaliação][minor revisions].

Este trabalho integrou um projeto finalista do prêmio ANP de Inovação Tecnológica em 2020. A descrição do prêmio está disponível <https://shre.ink/1Krt>. Uma apresentação do projeto está disponível: <https://shre.ink/HW1L>. Esse trabalho integrou o Programa de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e foi financiado parcialmente pela Petrobras.

1. Introdução

A inspeção de vasos separadores é uma das atividades necessárias para a manutenção da operação das plantas industriais. Os vasos separadores são um equipamento importante dentro da indústria petroquímica. Durante a sua vida útil, a estrutura é submetida a inspeções periódicas da sua integridade, objetivando a prevenção de acidentes. A principal técnica de inspeção são os ensaios não destrutivos (END), na qual uma análise da superfície externa do vaso é realizada por meio de sensores ultrassônicos [Fan et al. 2019].

As juntas soldadas são um dos pontos que merecem destaque durante a avaliação da integridade de uma estrutura. O processo de inspeção de um cordão de solda por ultrassom *phased-array* requer que as sapatas sejam posicionadas uma de cada lado do cordão de solda e se desloquem paralelamente ao cordão de solda [Yuan et al. 2016].

O desenvolvimento de um sistema robótico para a inspeção de vasos separadores é uma oportunidade para otimização do processo industrial [Ding et al. 2019]. A necessidade de inspeções periódicas é uma exigência para evitar falhas. Os impactos financeiro, ambiental, social e operacional nessa situação seriam massivos para a empresa.

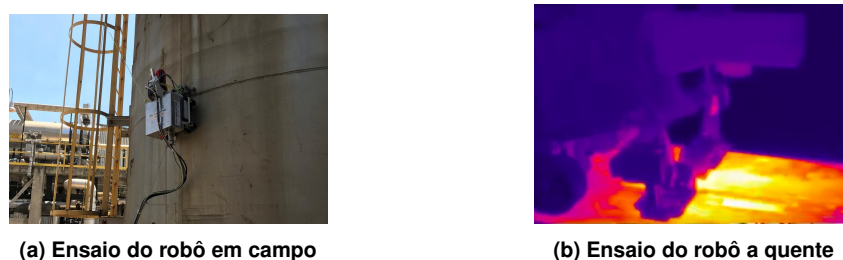
O robô de inspeção deve percorrer o cordão de solda com precisão milimétrica. O robô deve ser capaz de reconhecer o cordão de solda a partir das medições de sensores e ajustar a sua posição de um modo que as sapatas de ultrassom consigam verificar a presença de defeitos no cordão de solda. Logo, a implementação de uma estratégia de seguimento de cordão de solda é uma necessidade para a automatização da sua inspeção.

O objetivo geral desta dissertação é propor uma técnica para o reconhecimento de cordões de solda para a inspeção automatizada. Com o intuito de atingir essa meta, os objetivos específicos são: criar uma ferramenta para o seguimento de cordões de solda a partir do robô CRAS [Dalmedico et al. 2019], desenvolver um método capaz de reconhecer os cordões e indicar a sua posição em relação ao sistema de referência do robô, implementar uma estratégia de controle que execute o seguimento com a precisão necessária para a inspeção, realizar experimentos práticos em um aparato em condições similares a de um vaso separador e analisar os resultados para aferição do desempenho.

2. Robô escalador para inspeção avançada

Esta seção apresenta o robô escalador utilizado para a implementação do trabalho. O robô para inspeção avançada, o qual é chamado de CRAS (Climbing Robot for Advanced inSpection), é um robô escalador projetado para a inspeção de cordões de solda de vasos separadores de super-duplex. Um aspecto importante do projeto é que a superfície a ser inspecionada está sob a temperatura de 80°C até 135°C. A Figura 1 apresenta uma imagem da operação em campo do robô e uma imagem de um ensaio a quente do robô. O robô foi desenvolvido pelo Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado

(LASCA). Ele é baseado em gerações anteriores de robôs, as quais eram chamados de *Autonomous Inspection Robot*. [Santos et al. 2018, Teixeira et al. 2018].



(a) Ensaio do robô em campo

(b) Ensaio do robô a quente

Figura 1. Ensaio com o robô CRAS

A Figura 2 apresenta uma visão detalhada do robô CRAS. O robô possui quatro rodas magnéticas direcionais independentes. Cada roda possui um módulo de tração de direcionamento, os quais são responsáveis pelo deslocamento correto do robô. Um sistema de inspeção foi desenvolvido para o posicionamento correto das sapatas de ultrassom. Três sensores são utilizados como forma de percepção do ambiente. Um mini computador Intel NUC5i5RYH é utilizado para a comunicação com os sensores e motores do robô e a integração entre os componentes eletrônicos. O projeto mecânico do robô desenvolvido por Ventura e Dias está está descrito em [Ventura and Dias 2020].

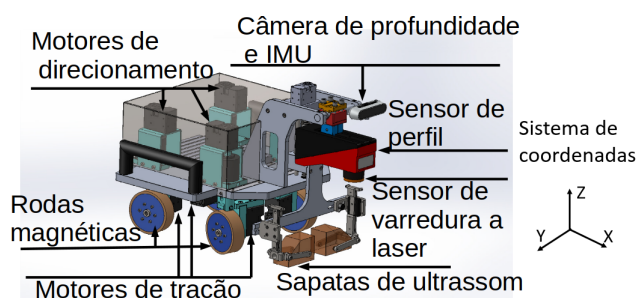


Figura 2. Detalhamento do robô CRAS

A técnica de inspeção aplicada para inspecionar os cordões de solda são os ensaios não destrutivos com ultrassom *phased-array*. Duas sapatas de alta temperatura coletam os dados do cordão de solda, usando água como acoplante. A posição do suporte das sapatas de ultrassom é definida por um fuso roscado, o qual abaixa durante a inspeção.

O robô possui três fontes de percepção para interagir com o ambiente. Um sensor de perfil é empregado para medir a posição do cordão de solda em relação ao robô. Um sensor de varredura a laser detecta os obstáculos durante a navegação do robô. Uma câmera de profundidade integrada com uma unidade inercial realiza a percepção da região frontal do robô e informa a orientação do robô em seis graus de liberdade. Além disso, a câmera permite a navegação remota pelo operador do sistema.

3. Percepções de cordões de solda

O método para a percepção do sinal é composto de duas etapas. A primeira parte é a identificação do cordão de solda, a qual é responsável por localizar a posição do cordão

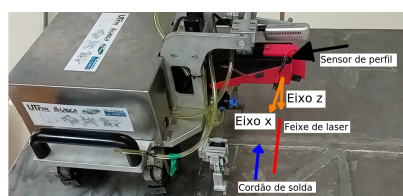
em relação ao sistema de referência do robô. A segunda parte é uma estratégia de controle para a execução do seguimento do cordão de solda, com base na localização do robô.

3.1. Algoritmo de reconhecimento

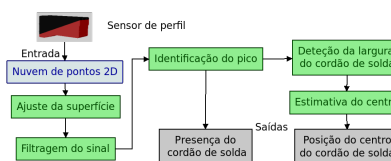
O reconhecimento de cordões de solda é uma necessidade para que o robô seja capaz de perceber a posição do cordão e se movimentar de acordo com essa decisão. Um algoritmo foi projetado para identificar o centro do cordão com base nos dados do sensor de perfil.

A Figura 3a apresenta o formato de coleta dos dados. O sensor de perfil emite um feixe de laser transversalmente sobre o cordão de solda. O sinal refletido é capturado pelo sensor e transmitido através uma nuvem de pontos. Cada ponto indica a posição do laser em relação ao sensor. O sistema de referência do sensor de perfil possui dois eixos. O eixo x indica a distância em relação ao centro do laser e o eixo z representa a altura.

A Figura 3b apresenta um diagrama da estratégia proposta. A entrada do sistema são as medições provenientes do sensor de perfil no formato de uma nuvem de pontos 2D. As saídas são a indicação da presença de cordão de solda no sinal medido e a posição do centro do cordão de solda, caso presença do cordão de solda for verificada. A abordagem é composta por cinco etapas, as quais são o ajuste de superfície, a filtragem do sinal, a identificação do pico, detecção da largura do cordão de solda e a estimativa do centro.



(a) Modelo para a captura dos dados.



(b) Arquitetura para o reconhecimento de cordão.

Figura 3. Modelo de aquisição e a arquitetura do algoritmo de reconhecimento.

A Figura 4 ilustra os sinais do sensor de perfil durante o processo de identificação. Os pontos verdes e os azuis indicam a superfície em que o cordão está inserido e o cordão de solda. A linha laranja e as linhas vermelhas representam parâmetros do corão calculados durante a detecção da largura. A Figura 4a mostra um exemplo do sinal adquirido pelo sensor com um cordão de solda, representado pela variação do nível médio do sinal. As Figuras 4b e 4c mostram, respectivamente, o sinal após o ajuste da superfície e a filtragem do sinal e o sinal durante a detecção da largura do cordão.

O primeiro passo é o ajuste de superfície. Ela retira possíveis inclinações da medição bruta do sensor de perfil. O sinal é separado em dois grupos e uma janela central contendo 80 pontos. O seu tamanho foi definido de acordo com a largura do cordão de solda presente no ambiente de testes. Nesta janela deve conter as medições do cordão de solda. Os grupos englobam as medições à esquerda e à direita da janela central. Para cada grupo, uma regressão linear é usada para estimar a superfície do vaso separador. A estimativa final da superfície é a média dos estimadores de cada grupo. A estimativa é subtraída do sinal completo, incluindo a janela central.

A segunda etapa é a filtragem do sinal. Ela é uma forma de atenuar a presença do ruído do sinal. Isso permite uma visão mais clara do cordão de solda. O método

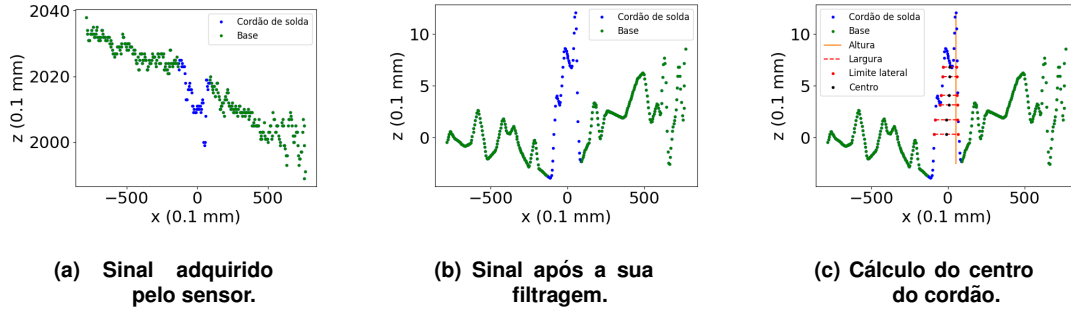


Figura 4. Sinais do cordão de solda durante o algoritmo de reconhecimento

de filtragem é chamado de *Surface Estimation via Analysis Method*, proposto por [de Moura et al. 2021].

O terceiro passo é a identificação do pico do cordão de solda. Inicialmente, os valores dos máximos locais do sinal e a sua respectiva posição são calculados. Os pontos de máximo são candidatos potenciais para o pico do cordão de solda. O ponto com a maior altura é selecionado como um candidato inicial para avaliar a presença de picos. Caso a altura do candidato seja menor que a resolução do sensor, o algoritmo é interrompido, e a ocorrência é transmitida para a saída da presença de cordão de solda.

Caso contrário, o candidato é avaliado com relação à distância em relação à última medição do centro do cordão de solda. Se a distância entre a posição do pico e a posição do centro do cordão é menor do que um valor determinado empiricamente, o candidato está na região do cordão de solda e, portanto, este é o pico do cordão de solda. Senão, um novo candidato é selecionado até que o pico do cordão seja encontrado.

A quarta etapa é a detecção da largura do cordão de solda. O objetivo principal deste módulo é de fornecer uma aproximação inicial do centro do cordão de solda. A largura do cordão de solda é determinada em seis níveis, os quais são definidos em relação à altura relativa do pico anterior. Nessas posições, uma linha horizontal é desenhada. Os pontos em que há uma intersecção entre o sinal do cordão de solda e a linha desenhada são definidos como limite lateral do cordão de solda.

Uma avaliação da presença de máximos locais próximos as borda no sinal é realizada para cada posição. A distância no eixo x entre o máximo local e o valor de cada limite do cordão de solda é calculada. Caso a distância entre o máximo local e o limite do cordão for menor que um limiar, o limite é recalculado a partir do máximo local.

A próxima etapa é definir a posição do centro do cordão para todos os níveis estipulados no módulo anterior. Em cada nível, o sinal possui dois limites, os quais são o limite à esquerda e o limite à direita. A posição do centro do cordão de solda em cada nível é definida como a média dos dois limites. A posição do centro do cordão de solda de uma medição é definida a partir do centro do nível que apresenta a menor distância em relação ao centro anterior. A Equação 1 ilustra esse cálculo, onde c_{i+1} e c_i representam o centro da medição $i+1$ e i , c_j , representa a posição do centro no nível j do cordão de solda.

$$c_{i+1} = \min((c_{0.3} - c_i), (c_{0.4} - c_i), (c_{0.5} - c_i), (c_{0.6} - c_i), (c_{0.7} - c_i), (c_{0.8} - c_i)) \quad (1)$$

A quinta etapa é a estimativa do centro. Este módulo visa calcular a posição do centro

do cordão de solda. A posição final do centro é calculada pela Equação 2. A Equação 2 apresenta o cálculo da posição final do centro do cordão de solda, onde c_i , c_{i-1} , c_{i-2} , c_{i-3} e c_{i-4} representam o centro da medição i , $i-1$, $i-2$, $i-3$ e $i-4$.

$$c = \frac{c_i + c_{i-1} + c_{i-2} + c_{i-3} + c_{i-4}}{5} \quad (2)$$

3.2. Controle de movimentos

O seguimento dos cordões de solda é necessário para a automatização das inspeções sem interferir no processo de coleta de dados dos sensores ultrassônicos. O sistema de controle possui como entrada o desvio do robô em relação ao centro do cordão de solda. A realimentação do sistema é realizada pela IMU e pelo sensor de perfil em conjunto com o algoritmo de reconhecimento do cordão de solda.

O controlador recebe o erro de alinhamento, a presença do cordão de solda e os dados fornecidos pela IMU como variáveis de entrada e fornece como variável de saída o modo de coordenação das rodas, o ângulo de direcionamento e a velocidade. A partir dessas informações, o robô CRAS ajusta a sua posição com o objetivo de manter a sua centralização durante seguimento do cordão de solda. O controlador é composto por quatro partes: controlador de seguimento de linha, o módulo de compensação da gravidade, o algoritmo para a execução de curvas e um comutador.

O controlador de seguimento de linha é responsável por implementar o seguimento de um trecho do cordão de solda sem considerar a influência provocada pela gravidade. Equação 3 apresenta o modelo da função sigmóide a qual os dados foram submetidos, onde y representa a variável dependente, x representa a variável independente e y_0 , x_0 , a e b são parâmetros para a definição da função. Os parâmetros da função sigmóide foram definidos a partir de testes empíricos.

$$y = y_0 + \frac{a}{(1 + e^{-(x-x_0)/b})} \quad (3)$$

A variável de entrada do sistema é o erro de alinhamento. O erro de alinhamento representa a distância necessária para a centralização do robô em relação ao cordão de solda. Ele é calculado a partir do centro do cordão, o qual é calculado pelo algoritmo de reconhecimento do cordão de solda. A variável de saída do controlador é o ângulo de alinhamento. O ângulo de alinhamento representa o ângulo necessário para ajustar as rodas no robô no momento que o robô esteja na horizontal.

O módulo de compensação da gravidade realiza um ajuste do posicionamento das rodas de acordo com a orientação do robô. O seu objetivo é a redução da incerteza provocada pela gravidade sobre o seguimento do cordão. O módulo recebe como entrada o ângulo de alinhamento calculado na etapa anterior e retorna um novo ângulo de direcionamento, o qual possibilita ao robô seguir o cordão em orientações diferentes da vertical. A orientação da gravidade é aferida por meio da medição da aceleração linear do robô.

O algoritmo para a execução de curvas é necessário para redirecionar o robô quando não existe um cordão de solda ao final do seguimento de um cordão. Ele implementa a busca de um novo cordão de solda, que está em uma posição perpendicular em relação ao anterior. A condição inicial do algoritmo considera que o robô está seguindo o

cordão de solda. A partir do momento em que o robô atinge o final do trecho seguido, o algoritmo de reconhecimento do cordão de solda identifica a ausência do cordão de solda na medição do sensor. O algoritmo para a execução de curvas é acionado neste instante.

3.3. Avaliação experimental

O sistema foi testado com base em três elementos. O primeiro elemento é o teste do reconhecimento do cordão de solda, o qual valida a melhora na proposta para a identificação. O segundo elemento é o controle do robô. Os experimentos avaliaram a influência da gravidade sobre o seguimento do cordão. A terceira parte é a execução de curvas.

3.3.1. Ambiente de testes

O aparato proposto por [Ventura and Dias 2020] foi utilizado para realizar a validação da abordagem proposta, simulando as condições que o robô encontraria em um vaso separador. Ele é composto por um suporte metálico e uma chapa metálica com 1,6 metros de comprimento e 1,5 metros de largura. A chapa possui uma parte interna, que é composta por aço inoxidável super duplex, e uma parte externa, que é composta por aço inoxidável duplex. O suporte permite a rotação completa do chapa, fixando a chapa em 8 posições, as quais são na vertical, na horizontal e na diagonal com ângulos de 45° , -45° , 135° e -135° . A chapa tem 36 secções de cordão de solda com 24 interseções entre elas. Cada secção representa um modelo de junta de solda. A altura média do cordão de solda é de aproximadamente 2 milímetros. A Figura 5 ilustra o aparato descrito.



(a) Aparato com a chapa na posição vertical



(b) Aparato com a chapa na posição diagonal a -45°

Figura 5. Aparato utilizado para a execução dos testes.

3.3.2. Análise do reconhecimento do cordão de solda

Esse experimento objetiva examinar o controle de seguimento de cordão de solda. O foco principal é a validação do algoritmo proposto para a identificação do cordão. Inicialmente, o robô está posicionado no começo do cordão de solda com o centro de alinhamento próximo do centro do cordão, como na Figura 7a. Ele deve seguir uma secção reta de 15 centímetros do cordão de solda até o seu fim, minimizando o erro de alinhamento.

O impacto de cada módulo do reconhecimento de cordão de solda é avaliado por meio de um teste de cinco passos. Em cada passo, é utilizado uma estratégia para o reconhecimento do cordão de solda. As abordagens foram criadas a partir dos módulos do algoritmo de reconhecimento. O experimento foi repetido 10 vezes para cada método. Os módulos presentes em cada passo são apresentados a seguir:

- P1: Identificação do pico
- P2: Identificação do pico e ajuste de superfície
- P3: Identificação do pico, ajuste de superfície e filtragem do sinal
- P4: Identificação do pico, ajuste de superfície, filtragem do sinal e detecção de largura do cordão de solda.
- P5: Todos os módulos.

O experimento mostrou que o robô é capaz de executar um seguimento preciso do cordão de solda com a utilização da abordagem completa em relação à abordagem que utiliza somente o pico do cordão de solda. O erro médio e o erro máximo obtidos foram 1,22 mm e 2,47 mm, respectivamente. A Figura 6 mostra a distribuição dos dados do módulo do erro de alinhamento e do ângulo de reconhecimento durante o experimento. Eles estão separados pelo método do reconhecimento do cordão de solda empregado para realizar a execução do seguimento do cordão de solda.

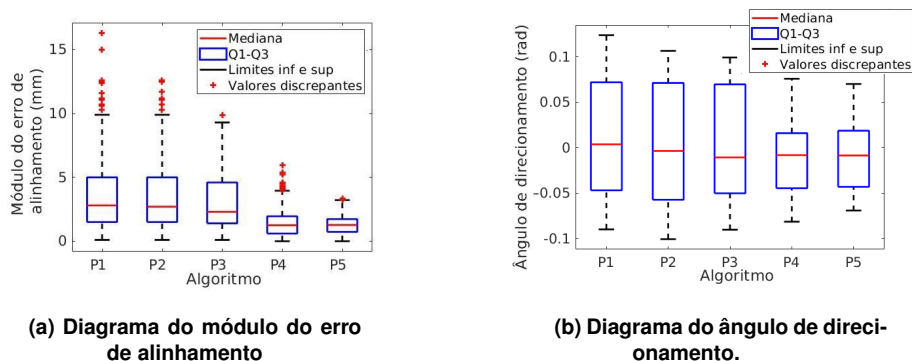


Figura 6. Distribuição do módulo do erro de alinhamento e do ângulo de orientação em função da estratégia de reconhecimento do cordão.

A redução da distância entre o primeiro e o terceiro quartil dos experimentos com os algoritmos P1, P2 e P3 em relação a P4 e P5 apontam um reconhecimento mais preciso do cordão de solda com aplicação do módulo de detecção de largura do cordão de solda. A medição do centro do cordão de solda proposta pelo módulo de detecção da largura do cordão de solda mostrou se uma estratégia eficiente para mitigar a variação do módulo do erro de alinhamento durante o seguimento do cordão de solda. Isso ocorre por causa do cálculo do centro do cordão de solda considerar mais de um ponto.

3.3.3. Análise da influência da gravidade

O objetivo desse experimento é discutir o desempenho do sistema em diferentes orientações. Dois grupos de experimentos foram criados para avaliar a ação do robô durante a variação da incidência da gravidade nos eixos x e y. Os experimentos ocorrem em duas secções do aparato. A variação da posição do robô é realizada a partir do posicionamento da chapa metálica. Inicialmente, o robô é posicionado no início da secção do cordão de solda com o centro de alinhamento do robô próximo do centro do cordão. Ele deve seguir a secção até o seu final, o qual está a uma distância de 15 centímetros de distância. Seis configurações foram elaboradas para avaliar o máximo número de situações. O experimento foi repetido 10 vezes para cada configuração. A Figura 7 exhibe a posição inicial do robô em cada configuração. As configurações estão descritas a seguir:

- Config. 1: Robô sem ação da gravidade no eixo x do robô.
- Config. 2: Robô sem ação da gravidade no eixo y do robô.
- Config. 3: Robô subindo uma superfície a 45°.
- Config. 4: Robô seguindo o cordão com a incidência da gravidade de 45° à esquerda.
- Config. 5: Robô descendo uma superfície a 45°.
- Config. 6: Robô seguindo o cordão com a incidência da gravidade de 45° à direita.

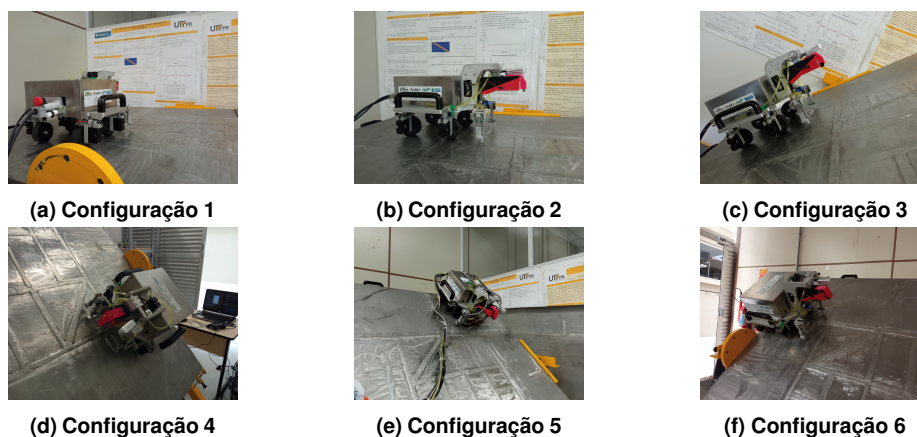


Figura 7. Posição inicial para cada configuração durante os experimentos da análise da influência da gravidade.

As configurações consideradas para avaliar a influência da gravidade no eixo x são as configurações 1, 3 e 5. As Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos do módulo do erro de alinhamento e do ângulo de direcionamento em função do tempo para as configurações 1, 3 e 5. Os gráficos mostram que a variação da gravidade no eixo x provocou uma variação no movimento do movimento do robô por causa do decréscimo da intensidade da força normal sobre o robô. O comportamento é visto na maior variação da média do módulo do erro de alinhamento nas configurações 3 e 5 em relação a configuração 1.

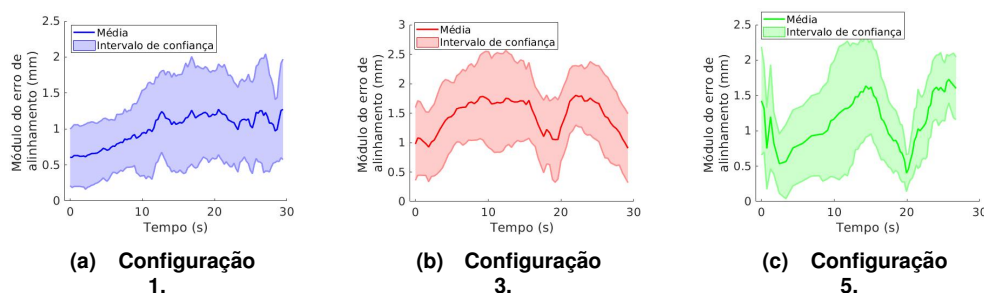


Figura 8. Gráficos do módulo do erro de alinhamento em função do tempo para as configurações 1, 3 e 5.

As configurações consideradas para avaliar a influência da gravidade no eixo y são as configurações 2, 4 e 6. As Figuras 10 e 11 mostram os gráficos do módulo do erro de alinhamento e do ângulo de direcionamento em função do tempo para as repetições executadas nas configurações 2, 4 e 6. Nos gráficos, é possível perceber a ação da compensação da gravidade sobre o sistema. Por causa do efeito da gravidade, o robô tende a escorregar no seu eixo y, desviando o robô da sua localização ideal. As correções implicam em um módulo maior do ângulo de direcionamento, como é possível observar na Figura 11.

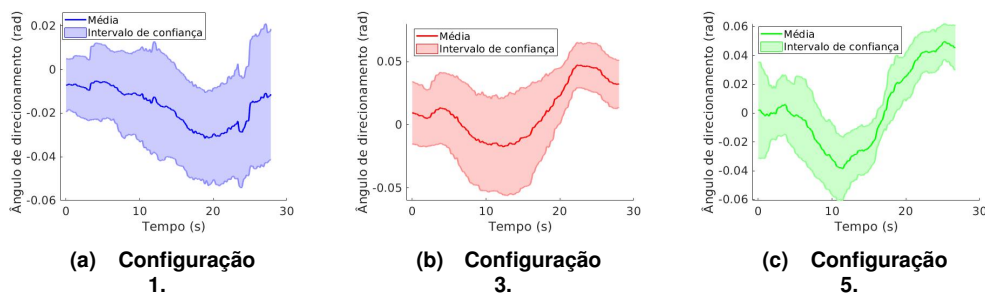


Figura 9. Gráficos do ângulo de direcionamento em função do tempo para as configurações 1, 3 e 5.

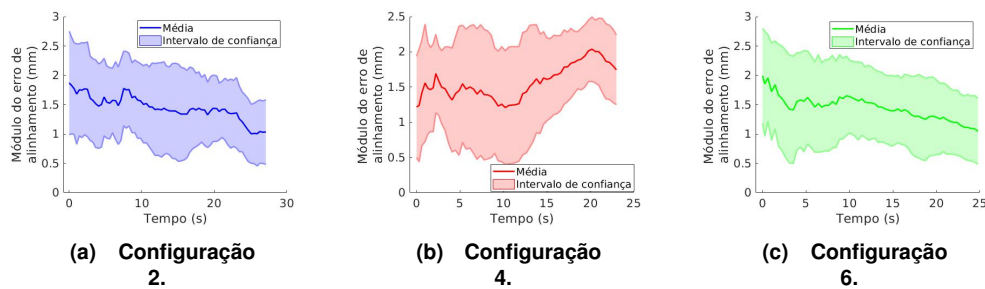


Figura 10. Gráficos do módulo do erro de alinhamento em função do tempo para as configurações 2, 4 e 6.

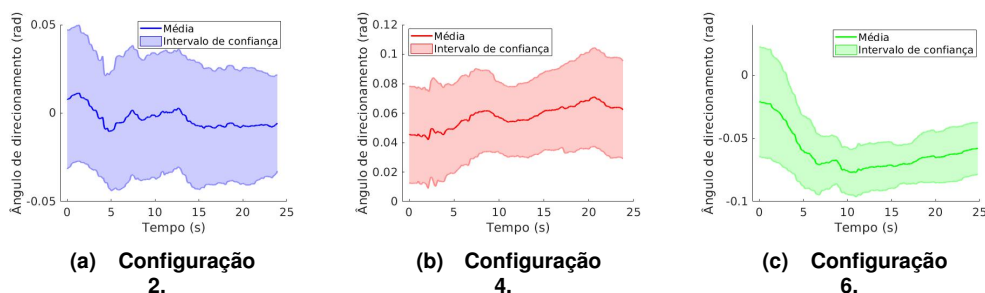


Figura 11. Gráficos do ângulo de direcionamento em função do tempo para as configurações 2, 4 e 6.

3.3.4. Execução de curvas

Esse experimento objetiva demonstrar a operação do robô de redirecionar o robô de um cordão de solda para um novo cordão, o qual está em uma posição perpendicular em relação ao cordão inicial, e estimar o erro de alinhamento após a execução de uma curva. O robô foi posicionado no meio de uma seção do cordão de solda e requerido a redirecionar para um novo cordão que é perpendicular ao cordão antigo. O experimento foi repetido 10 vezes. Os erros médio e máximo do alinhamento do robô ao final do algoritmo de curvas foram de 1,81 e 3,02 milímetros. Com base nesses valores, é possível concluir que, ao final do procedimento, o robô está apto a iniciar o seguimento de um novo cordão.

3.4. Análise global

Três conjuntos de experimentos foram realizados para avaliar as características do controle de seguimento do cordão de solda em um aparato que simula as condições de um

vaso separador. Os experimentos validaram o reconhecimento do cordão de solda e o seguimento do cordão, considerando as variações na incidência da gravidade.

A Tabela 1 mostra o erro médio, a precisão e o erro máximo do módulo do erro de alinhamento em conjunto com o seu intervalo de confiança durante os ensaios para a análise da influência da gravidade. As configurações definidas são as orientações do robô usadas no ensaio, ilustradas na Figura 7. O experimento para a avaliação do reconhecimento do cordão está contida na configuração 1 do segundo conjunto de experimentos.

A variação da atuação da gravidade sobre o robô impactou no desempenho do seguimento do cordão de solda, aumentando o erro médio do módulo do erro de alinhamento quando comparado com a configuração 1. Entretanto, essa diferença não é significativa para a aplicação desejada, uma vez que o seu erro médio está na ordem de milímetros. Os resultados obtidos apontam para uma precisão similar para todas as configurações realizadas. Isso indica que a mudança da orientação do robô não gerou uma oscilação no valor do erro de alinhamento. A navegação mais precisa ao longo do cordão promove uma atenuação no deslocamento lateral do robô, melhorando a captura dos dados de ultrassom.

Tabela 1. Análise geral considerando o erro médio, a precisão e o erro máximo de acordo com a orientação do seguimento do cordão de solda

Config.	Erro médio (mm)	Intervalo de confiança (mm)	Precisão (mm)	Intervalo de confiança (mm)	Erro máximo (mm)	Intervalo de confiança (mm)
1	1,06	(0,86; 1,26)	0,73	(0,57; 0,89)	2,54	(2,02; 3,06)
2	1,34	(1,05; 1,63)	0,76	(0,60; 0,92)	2,99	(2,57; 3,41)
3	1,34	(1,10; 1,58)	0,77	(0,59; 0,95)	2,84	(2,41; 3,27)
4	1,49	(1,27; 1,71)	0,85	(0,67; 1,03)	3,04	(2,61; 3,47)
5	1,32	(1,03; 1,61)	0,77	(0,68; 0,86)	2,93	(2,56; 3,30)
6	1,32	(0,99; 1,65)	0,79	(0,63; 0,95)	2,85	(2,51; 3,19)
Geral	1,31	(1,05; 1,57)	0,78	(0,62; 0,95)	2,86	(2,44; 3,28)

Um aspecto a se destacar é a manutenção da precisão do seguimento, mesmo com a variação da orientação do robô. O robô foi exposto a situações que emulam as condições de um vaso separador. O robô foi capaz de superar as alternâncias de orientação e executar as correções necessárias para um seguimento preciso do cordão, como visto na Tabela 1.

4. Conclusão

Esse trabalho apresentou uma nova técnica de reconhecimento de cordões de solda. O método foi empregado para automatizar a inspeção de cordões de solda. O objetivo dessa técnica é propor um método confiável para a detecção do cordão. A identificação do cordão de solda foi integrada uma estratégia para o seguimento do cordão. Uma questão abordada neste trabalho é a incerteza provocada pela gravidade durante a movimentação do robô. O trabalho apresentou um avanço nas técnicas de processamento de dados do sensor de perfil para a identificação do cordão de solda. O seguimento atingiu um erro que é próximo da precisão do sensor de perfil, a qual é próxima de 1 milímetro.

Diversas alternativas para execução de trabalhos futuros são possíveis. Uma opção é o uso de mais sensores para a detecção do cordão de solda. A fusão de sensores permite

a detecção da posição da solda em mais de um ponto, permitindo ao robô uma visão ampla do local. Além disso, o sistema se tornaria mais robusto às condições encontradas em campo, uma vez que haveria uma redundância na identificação da solda.

Referências

- Dalmedico, N., Santos, H. B., Slongo, J. S., Teixeira, M. A. S., Palar, P. S., Terres, V. V., Oliveira, A. S. d., Arruda, L. V. R. d., Neves Júnior, F., and Ramos, J. E. (2019). Cras (climbing robot for autonomous inspection): The challenges of a high-temperature tank. In *Iberian Robotics conference*, pages 327–338. Springer.
- de Moura, H. L., Almeida Prado, T. d., Guarneri, G. A., Passarin, T. A. R., Rossato, D., Pires, G. P., and Pipa, D. R. (2021). Surface estimation via analysis method: A constrained inverse problem approach. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 68(11):3386–3395.
- Ding, Y., Sun, Z., and Chen, Q. (2019). Non-contacted permanent magnetic absorbed wall-climbing robot for ultrasonic weld inspection of spherical tank. In *MATEC Web of Conferences*, volume 269, page 02013. EDP Sciences.
- Fan, W., Wan, D., Xu, Z., Wang, Y., and Du, H. (2019). Feature extraction of echo signal of weld defect guided waves based on sparse representation. *IEEE Sensors Journal*, 20(5):2692–2700.
- Palar, P. S., Oliveira, A. S. d., Terres, V. d. V., and Ramos, J. E. (2019). Automated inspection of pressure vessels through a climbing robot with sliding autonomy. In *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 287–292.
- Palar, P. S., Terres, V. d. V., and Oliveira, A. S. d. (2020). Human–robot interface for embedding sliding adjustable autonomy methods. *Sensors*, 20(20).
- Santos, H. B., Teixeira, M. A. S., de Oliveira, A. S., de Arruda, L. V. R., and Neves-Jr., F. (2018). Quasi-Omnidirectional Fuzzy Control of a Climbing Robot for Inspection Tasks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 91(2):333–347.
- Teixeira, M. A. S., Santos, H. B., Dalmedico, N., de Arruda, L. V. R., de Oliveira, A. S., et al. (2018). Intelligent environment recognition and prediction for ndt inspection through autonomous climbing robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 92(2):323–342.
- Terres, V. d. V., de Oliveira, A. S., Santos, H. B., de Arruda, L. V. R., Neves, F., Fabro, J. A., and Ramos, J. E. (2019). Rigorous tracking of weld beads for the autonomous inspection with a climbing robot. In *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 252–257. IEEE.
- Ventura, G. F. and Dias, L. (2020). Desenvolvimento de projeto e protótipo de robô compacto para a inspeção de juntas soldadas em superfícies metálicas verticais. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)*.
- Yuan, C., Xie, C., Li, L., Zhang, F., and Gubanski, S. M. (2016). Ultrasonic phased array detection of internal defects in composite insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1):525–531.