

MANIPULADOR ROBÓTICO REMANUFATURADO DOTADO DE SISTEMA DE VISÃO PARA USO EM SOLDAGEM

Alexandre Queiróz Bracarense¹
Fagner Guilherme Ferreira Coelho¹
Eduardo José Lima II¹
Marcelo Henrique Souza Bomfim¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo: A crescente aplicação de sistemas de visão em processos automatizados vem aumentando a cada dia. E de modo a simular tal situação em meio acadêmico, este trabalho propõe agregar um sistema de visão de baixo custo a um manipulador remanufaturado, que funcione de forma confiável e algoritmos que exigem a mínima interferência do operador, irá permitir que o manipulador robótico realize soldas a arco a partir da identificação, da localização e orientação de uma peça sobre uma mesa sem a necessidade de nenhum conhecimento prévio ou outro tipo de sensor que o auxilie. Após a aquisição da imagem pelo sistema de visão, esta é convertida em pontos de transformação entre os sistemas coordenados de referência do plano da imagem, e o de referência do mundo, permitindo assim que o método proposto apresente uma imagem como um dado de entrada para que o manipulador robótico defina sua trajetória e realize a operação de soldagem sobre as coordenadas obtidas pelo processamento da imagem capturada. O foco principal desta pesquisa é verificar não só o cumprimento da tarefa de posicionamento, bem como, a robustez frente às variações do entorno, demonstrando que o sistema apresente uma excelente relação custo-benefício.

Palavras-chave: Visão Computacional, Baixo Custo, Robótica, Soldagem

1. INTRODUÇÃO

O uso de manipuladores robóticos em aplicações de diversos segmentos, desde residencial até industrial está tomando uma proporção elevada, e torna-se indispensável para o aumento da produtividade, substituição para executar tarefas muita vezes insalubres, e para garantir a repetitividade do trabalho, que neste último caso, o tempo de execução dos serviços é cada vez menor sem prejudicar a qualidade dos produtos. Pensando nas vantagens da utilização de robôs na indústria, este trabalho retrata uma aplicação utilizando o manipulador ASEA IRB6 que passou por um processo de remanufatura chamado de *overhauling*, em que apenas a estrutura mecânica foi reaproveitada enquanto que todo seu sistema de controle foi desenvolvido de modo a possuir uma linguagem de programação que não seja proprietária. Basicamente, a implementação deste artigo utiliza o processo de imagens para identificar o posicionamento e orientação de peças sobre uma mesa, onde estas possuem cores que tenham contraste com o local onde se encontram.

Este projeto poderia desempenhar as mais diversas funções dentro da indústria, utilizando o processamento de imagens juntamente com o robô, é possível garantir que o robô se torne apto a atuar em células de manufatura que processam das mais diversas formas as peças.

1.1. Manipulador ASEA

O Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG recebeu em 1998 uma doação pela Fachhochschule da Alemanha, um manipulador robótico, modelo IRB6-S2, conforme a FIG. 1, fabricado pela ASEA (atual ABB), no ano de 1977.

Este foi o primeiro robô industrial totalmente elétrico produzido no mundo, já que até então, o acionamento era realizado por sistemas hidráulicos. Este robô possui cinco graus de liberdade e capacidade de carga de 6 Kg, construído para aplicações de soldagem na indústria automobilística.

Este equipamento passou por um processo de *overhauling*, como apresentado por BOMFIM (2013), onde apenas sua parte estrutural mecânica foi reaproveitada, e seu *hardware* (motores, sensores de posição, gabinete de controle e *softwares* geradores de trajetória), foram atualizados. Como comparativo, o processo de *retrofitting* visa atualizar os componentes eletromecânicos e eletrônicos do gabinete de controle, fazendo adaptações de forma a torná-lo intercambiável com alguns fabricantes de robôs.



Figura 1. Robô ASEA.
Fonte: O autor, 2016.

Este projeto propõe a integração de duas tecnologias, sistemas de controle para manipuladores robóticos e sistema de visão artificial, cujo objetivo é adotar um sistema de visão de baixo custo para controlar a trajetória de um robô remanufaturado que utiliza algoritmos desenvolvidos para gerenciar sua cinemática, tornando-o capaz de realizar diferentes movimentações conforme a imagem capturada do produto, proporcionando autonomia e flexibilidade.

1.2. Sistema de Visão

Grandes esforços vem sendo realizados para prover às máquinas a habilidade da visão humana, pois este sentido é uma das técnicas de detecção mais complexas, e vem sendo reproduzida para ser utilizada em sistemas robóticos e de automação.

Visão artificial, visão de máquina, visão robótica ou visão computacional é o processo de extração, caracterização e interpretação de uma determinada informação a partir de imagens obtidas do mundo tridimensional. Segundo LENZ e TSAI (1989), quando um robô utiliza de uma câmera para estimar a posição e orientação de um objeto em relação à sua base, é necessário conhecer a localização relativa entre sua garra (elemento final) e a base do robô, entre a câmera e a garra e entre o objeto e a câmera. Diante destas informações é possível calcular a posição e orientação do objeto em relação à base do robô, que geralmente é também a referência do sistema de coordenadas do mundo. Conforme apresentado na FIG. 2, as tarefas que estimam essas três relações são conhecidas respectivamente como calibração do robô, calibração garra-câmera e calibração da câmera. Então a configuração sugerida pelos autores é que a câmera esteja instalada no *end effector*, ou seja, no elemento final do manipulador.

A calibração da garra do robô é obtida através dos cálculos das transformações dos sistemas de coordenadas de cada elo com a inclusão de suas cinemáticas inversa e direta. Com isso, é possível relacionar matematicamente as coordenadas relacionadas ao sistema coordenado da garra do manipulador robótico com as coordenadas de sua base, conforme VIANNA (2009).

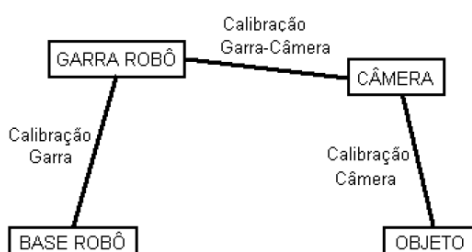


Figura 2. Sistemas de calibração.
Fonte: Vianna, 2009.

Diversas técnicas de reconhecimento de imagens tem sido apresentadas na literatura e geralmente são validadas através de protótipo de aplicações, pois em um ambiente industrial, raramente obtém-se as condições ideais de iluminação, contraste, posicionamento correto da peça e do ângulo de obtenção da imagem, além de outros fatores externos que dificultam a interpretação de uma cena, RUSS (2007).

Para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foram utilizados algoritmos que basearam-se em diferentes conceitos teóricos encontrados na bibliografia no estado da arte, podendo citar um destes, o *Bounding Box*, BAREQUET (2001), que se mostrou mais adequado a suprir as necessidades da atividade proposta.

Devido ao elevado custo adotado na indústria para automatizar seus processos, fica inviável transferir tal configuração para o meio acadêmico. E conforme exposto anteriormente sobre os elevados custos para a aquisição de sistemas de visão, e levando em consideração que se está utilizando um robô de baixo custo devido ao processo de

overhauling em que o mesmo foi submetido, decidiu-se agregar um sistema que seja viável financeiramente, sem comprometer a eficiência de seu funcionamento. Os objetivos específicos para se alcançar o resultado esperado são:

1. Uso de imagem estática como fonte de dados, identificando posicionamento de peças e relacionando as coordenadas dos *pixels* com as coordenadas em milímetros do sistema mundo;
2. Obter as coordenadas, para geração da trajetória do robô;
3. Analisar e discutir os custos associados ao sistema de visão, e o quanto esse sistema pode ser simplificado a fim de baixar o custo, sem comprometer o desempenho e sua aplicabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho aborda o desenvolvimento e melhoria de um sistema de visão desenvolvido por CORKE (1996), que apresente um baixo custo agregado a hardware e software independentes, aplicados em um manipulador robótico fixo industrial remanufaturado. Para o auxílio na calibração do sistema mecânico do manipulador remanufaturado, foram utilizados acelerômetros, LOPES (2015), conforme apresentado na FIG.3, de modo a garantir que a quantidade de pulsos enviados aos drives dos motores seja a necessária para a realização de movimentos e deslocamento em trajetória definida.

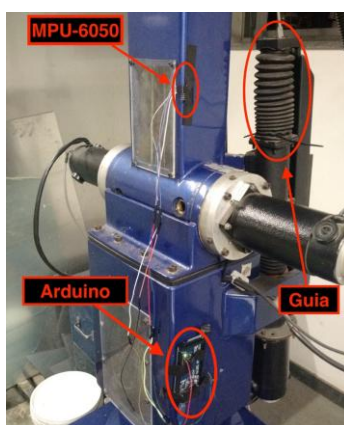


Figura 3. Calibração da junta 2 com acelerômetros.
Fonte: Lopes, 2015.

O projeto do sistema de visão computacional de baixo custo tem como estrutura a FIG. 4 que apresenta uma sequência desenvolvida, e que é explicada a seguir.

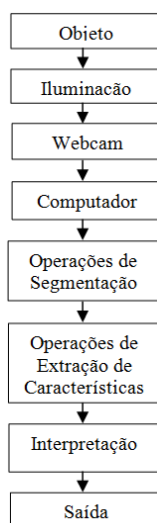


Figura 4. Sequencia desenvolvida.
Fonte: O autor, 2016.

O objeto é o elemento da cena a ser considerado, no quesito "Iluminação" é considerado a luz natural do ambiente, com isso, reduz o custo de alguns elementos. O uso da *WebCam* como elemento sensor torna capaz substituir ou até mesmo eliminar os itens como de "Lentes" + "Câmera dedicada" + "Placa de Aquisição". Nas etapas de "Operações de Segmentação" e "Operações de Extração de Características", foram utilizados algoritmos simples, mas funcionais para a proposta do sistema, de modo a determinar as características da peça na imagem, converter em informações métricas para que o manipulador possa se deslocar sobre a mesma no ambiente 3D.

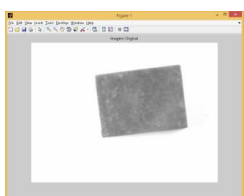
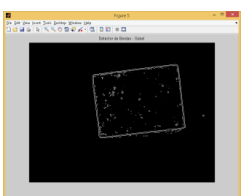
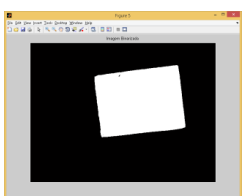
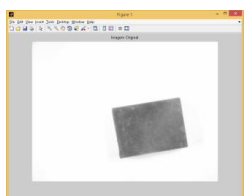
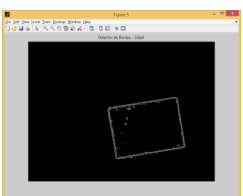
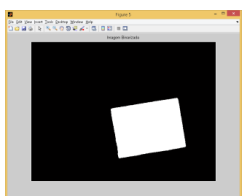
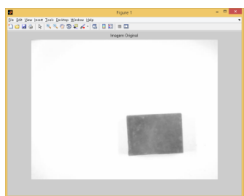
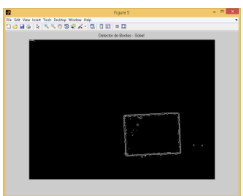
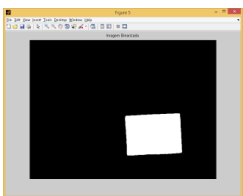
A seguir é apresentada uma prévia do que se obtém seguindo a metodologia proposta. A imagem é capturada por um elemento transdutor, uma *WebCam*, e então é digitalizada e armazenada para que em seguida possa ser processada por um algoritmo. Este, por sua vez, é responsável por todo desenvolvimento do tratamento e interpretação da imagem e extração das informações desejadas. Uma interface entre o computador e o robô torna-se necessária para transformar os dados resultantes do processamento da imagem obtida em um formato que o controlador do manipulador robótico compreenda.

Após receber os dados na linguagem adequada, o controlador envia comandos para os atuadores do robô, e então a tarefa é executada. Por fim este sistema obtém uma nova imagem que analisa computacionalmente se o objetivo da tarefa foi realizado com sucesso, fazendo assim um controle qualitativo do processo. A cena em que o sistema está inserido apresenta as seguintes características:

- Ambiente físico e real com iluminação constante;
- O formato do objeto não possui limitação, mas sim a necessidade de ser plano;
- A posição de captura da imagem não varia de acordo com a espessura da peça.

A calibração da câmera independente do ambiente em que a mesma está inserida, e deve ser realizada como um elemento avaliativo das características intrínsecas de modo a avaliar melhor o dispositivo óptico. Esta etapa foi realizada em duas fases, sendo nesta primeira a obtenção de novas imagens de modo aleatório, sendo que foram retiradas 03 fotos em alturas diferentes, e estão apresentadas no QUADRO (1) como imagem original, o detector de bordas "SOBEL" e binarização.

QUADRO 1
Imagens obtidas com a *WebCam*.

1 - Imagem Original	2 - Detector de bordas SOBEL	3 - Binarização
		
		
		

FONTE: O AUTOR, 2015.

No QUADRO (1) a câmera utilizada possui ajuste automático de foco, e é possível observar nas imagens binarizadas à direita remetem a pouca sensibilidade a ruídos, os resultados apresentam uma melhor detecção do objeto de interesse.

A segunda fase consistiu em utilizar o *checkerboard*, e obter sete imagens diferentes, conforme apresentado no mosaico da FIG. 5.

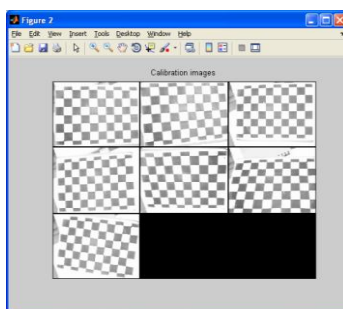


Figura 5. Mosaico de imagens para câmera.
Fonte: O autor, 2016.

Após uma primeira calibração da câmera, é possível realizar uma série de procedimentos que permitem analisar e estimar com maior precisão seus parâmetros. Os resultados relevantes da calibração da câmera após a otimização apresentou os seguintes valores:

Focal Length: $fc = [932.61605 \ 928.58993] \pm [24.08841 \ 24.12205]$

Principal point: $cc = [447.31942 \ 305.88530] \pm [15.23891 \ 12.28776]$

Distortion: $kc = [0.05018 \ -0.57353 \ -0.00033 \ -0.00030 \ 0.00000] \pm [0.05064 \ 0.19566 \ 0.00325 \ 0.00586 \ 0.00000]$

Pixel error: $err = [0.85689 \ 0.95417]$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo utilizado no processo de calibração das câmeras apresentados na seção anterior em que o conjunto de parâmetros é obtido através da minimização iterativa da distancia entre as coordenadas dos pontos do gabarito nas imagens utilizadas na calibração e as coordenadas dos pontos reprojetados nestas mesmas imagens, segundo um conjunto de valores iniciais para os parâmetros. Uma implementação deste método está disponível na forma de um *Toolbox* para o *MatLab*® na página da *Web* em http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, que permite ler imagens, extrair pontos, calibrar câmeras, controlar precisões, corrigir imagens distorcidas, alterar o modelo intrínseco da câmera escolhendo quais os parâmetros a otimizar. Todas estas e outras ferramentas que compõem o método de calibração, baseiam-se em HEIKKILÄ e SILVÉN (1997). Um método indicado como extremamente preciso HERBST (2003), utiliza um procedimento de quatro passos, que são os seguintes: no passo 1, é realizada uma aproximação linear para determinar uma solução analítica dos parâmetros da câmera (sem considerar a distorção da lente); no passo 2, estima-se a distorção radial e tangencial da lente e dos restantes parâmetros a partir de uma otimização não linear utilizando o método dos Mínimos Quadrados; no passo 3, é realizada uma correção e posterior extração dos pontos de calibração na imagem; e por fim no último e quarto passo, ocorre à correção das coordenadas que possam ter sido obtidas através de imagens distorcidas.

Após a escolha da câmera e calibração do ambiente com este equipamento e seus parâmetros, os testes iniciais obtidos estão representados na FIG.6. A rotina do programa chama a *WebCam*, e a mesma já apresenta a imagem a ser capturada na tela do computador, é aguardado um tempo para a estabilização da iluminação.

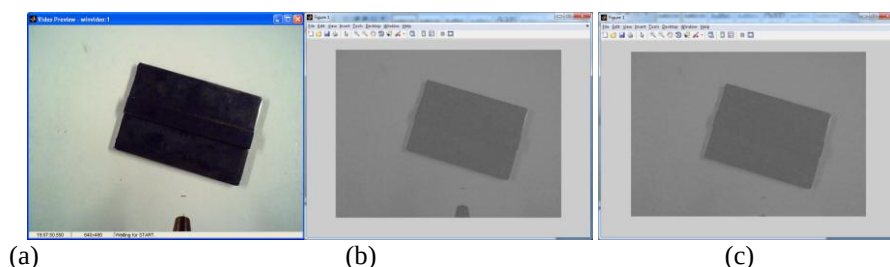


Figura 6. Processo de obtenção e processamento da imagem.
Fonte: O autor, 2016.

Já para o processamento de imagem a primeira operação é a redução desta para eliminar o bocal da tocha, e após o recorte do bocal na imagem a mesma é redimensionada e convertida para tom de cinza, FIG.7c.

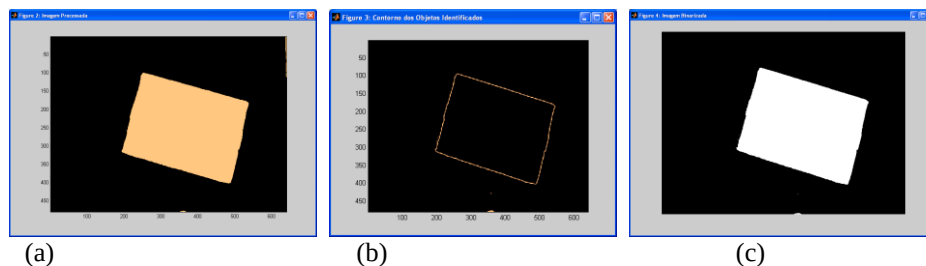


Figura 7. Identificação do objeto.
Fonte: O autor, 2016.

A FIG. 7(a) apresenta uma operação de remoção de valores de RG da imagem RGB inicial, e em seguida atribuindo a cor cobre ao objeto encontrado com esta operação. Já na FIG. 7(b) é apresentada a esqueletização do objeto encontrado, mediante aplicação de convoluções e do filtro de SOBEL. Com a realização da binarização do objeto encontrado na imagem, a FIG. 7 (c) apresenta o resultado desta operação.

Como resultados da segmentação tem-se as centroides das regiões encontradas na imagem, acompanhados da quantidade de *pixels* presentes em cada região, além das coordenadas do menor retângulo envolvente que inclui a região *Bounding Box*. Com o uso de filtros de SOBEL, Gaussianos, convoluções, e limiares, determinam se a quantidade de objetos obtidos na imagem extraída da cena, tornando a imagem totalmente binarizada. Após este processo aplica-se o algoritmo *Bounding Box* para detecção dos pontos coordenados extremos do objeto.

Após esta etapa é gerado o contorno no objeto encontrado, apresentado na FIG.8, e a cada quina é atribuído um valor em *pixel* devido à aplicação do *Bounding Box* e estes valores são convertidos para milímetros e então são armazenados em uma planilha, que serão lidos posteriormente para gerar a trajetória do manipulador e serão convertidos em código G que será executado no *Mach3*[®] para o deslocamento do TCP ao longo de sua trajetória para realizar a tarefa programada.

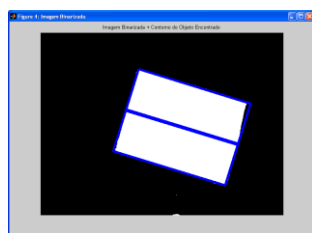


Figura 8. Obtenção do objeto na imagem e seu contorno.
Fonte: O autor, 2016.

Este trabalho possui duas metodologias fundamentais para a execução das tarefas, sendo o processamento de imagens e a geração de trajetórias para manipuladores.

O processamento de imagens é um conceito relativamente novo e está relacionado a qualquer forma na qual a entrada ou saída de um sistema é representada por uma imagem. No caso em questão, a imagem era utilizada para definir a posição e orientação dos objetos sobre a mesa, e a partir disso, tomar decisão para realizar a atividade sobre os objetos localizados.

Uma imagem é formada por um conjunto de *pixels* sendo que o número de *pixel* é dado pela resolução da imagem. Os *pixels* fornecem um conjunto de variáveis que indicam a cor de cada ponto específico da imagem, permitindo assim que lógicas sejam implementadas, como a identificação de um objeto, determinação de suas dimensões, por exemplo.

Todo o sistema foi desenvolvido considerando um elemento retangular, mas a função *regionprops*, não está limitada a apenas esta forma geométrica, permite identificar diversas formas, em contrapartida, o manipulador robótico utilizado apresenta uma limitação de movimentos por não possuir o sexto eixo que permitiria movimentos rotacionais do eixo quatro e cinco simultaneamente.

Como pontos positivos de todo o sistema, pode-se destacar a robustez: em que faz a separação do objeto da imagem mesmo se a cena 3D estiver com ruídos; a repetitividade na obtenção dos dados de posicionamento da peça sobre a mesa; a não perda da calibração do manipulador. A sequência de imagens da FIG. 9 apresenta a identificação da localização da peça sobre a mesa. É interessante ressaltar que mesmo com a imagem não estando em tão boa qualidade obteve o contorno de modo satisfatório.

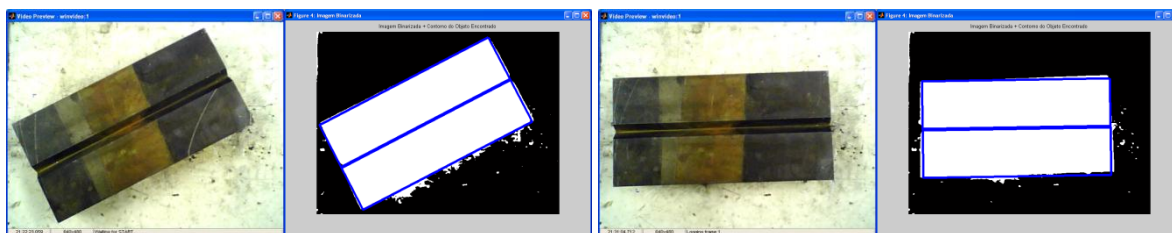


Figura 9. Identificando a posição da peça e gerando a trajetória do manipulador.

Fonte: O autor, 2016.

As literaturas falam das condições perfeitas de iluminação em que um sistema de visão deve estar submetido, mas com o que foi proposto abriu-se mão da grande flexibilidade que traz uma elevação no custo. A medida que foram feitos testes de soldagem e ocorreram movimentação de peças sobre a mesa, a pintura da mesma foi desgastando, neste ponto é que foi possível avaliar a robustez do algoritmo que não apresentou nenhuma necessidade de alteração mediante esta nova condição da cena 3D. A FIG. 10 apresenta as condições atuais da mesa.

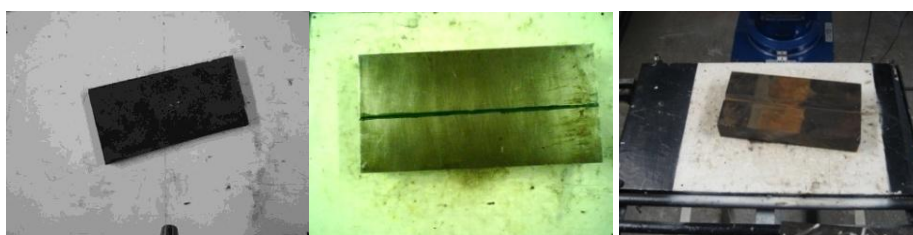


Figura 10. Robustez do sistema desenvolvido.

Fonte: O autor, 2016.

A escolha pela câmera de menor valor, foi comprovada como assertiva, uma vez que mediante o algoritmo, e às grandes variações ocorridas na cena, não houve necessidade de implementações. E considerando que o robô é um manipulador que passou por um processo de remanufatura, este também teve um desempenho satisfatório para o que foi almejado neste trabalho.

Os ensaios realizados apresentaram uma robustez satisfatória do sistema desenvolvido, valendo ressaltar a necessidade de haver uma diferença entre as cores dos objetos na cena, sendo que ao menos o contorno da peça deve apresentar tonalidade mais escura que a da mesa.

A cada orientação da peça é necessário obter uma inclinação correta da ferramenta, no caso a tocha de soldagem para que a mesma possa obter o ângulo de ataque de forma adequada e realizar a soldagem de forma correta. Para esta etapa, grande foi a dificuldade para a correção deste parâmetro, uma vez que a falta do sexto eixo do manipulador resultou em mais uma variável a ser considerada no momento da geração da trajetória para os dois sentidos de soldagem, conforme apresentado na FIG. 11. Com a solução desta situação comprovou-se que os recursos utilizados são os mínimos necessários para o sistema de baixo custo proposto.

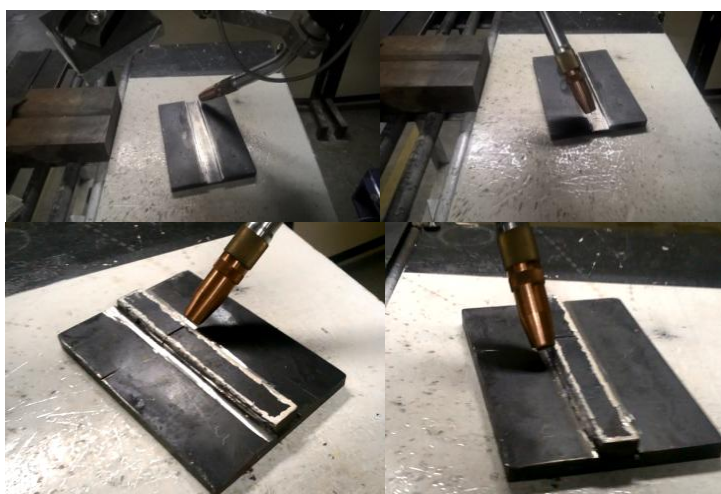


Figura 11. Correção ângulo de ataque da tocha.

Fonte: O autor, 2016.

Inicialmente utilizando a *Webcam*, realizou-se o processamento da imagem de forma que cada peça fosse identificada facilmente. Para essa análise considerou-se que a imagem tinha uma resolução definida no programa.

Após o processo de calibração do sistema não houve nenhum problema no reconhecimento de cores. Independente se a quantidade de luz no ambiente era muito alta, ou um pouco mais baixa, o programa encontrou as cores das peças em cada setor corretamente. Além disso, é importante ressaltar que a identificação das peças independente das posições em que elas estavam, desde que elas estejam dentro da área de trabalho.

A transformação de um robô de cinco graus de liberdade de modo que o mesmo tenha o mesmo comportamento de que uma máquina ferramenta é o diferencial deste trabalho. Pois além desta conversão, foi possível adicionar ao sistema um sistema de visão, de modo a permitir que se torne o mais independente possível na realização de sua tarefa. Com a inclusão do sistema de visão, a planta se torna retroalimentada, e permite uma ação mais eficiente do controle do sistema.

4. CONCLUSÕES

A metodologia demonstrou que a programação parametrizada em equipamentos CNC é uma técnica útil para aumentar a flexibilidade e a potencialidade de sistemas produtivos. A geração de programas CNC dotado de sistema de visão apresenta vantagens e aplicabilidade de manipuladores industriais que são descartados.

A aplicabilidade do equipamento se dá em ambiente acadêmico, sendo que o sistema de controle do manipulador foi substituído por software para que a linguagem de programação, tanto para processamento de imagem quanto a geração de trajetória fosse desenvolvida através do *Matlab*[®] e *Mach3*[®].

Embora uma máquina possa apresentar vários movimentos, nem sempre ela é capaz de realizar todos ao mesmo tempo. Mas com o uso do *Matlab*[®] na geração de trajetória e com uso da cinemática direta e inversa do manipulador, foi possível desenvolver a interpolação das juntas, e com isso, o movimento simultâneo dos eixos quando necessário. Com o desenvolvimento desse trabalho, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

Elevada a robustez e baixas limitações foram obtidas com este sistema ao se considerar a detecção do contorno do objeto sob condições não necessariamente definidas como ideais pelas literaturas. Como limitações apontamos a condição da peça não poder ser totalmente brilhante, o que resulta em brilho excessivo e a consequente não definição de seu contorno. As dimensões da peça também são uma limitação do sistema que implica que não se tornou capaz de apresentar resultados satisfatórios, quando obtidas imagens sobre a mesma posição e orientação da câmera.

O maior fator que impede a adoção em massa de robôs é seu alto custo. O tempo que leva para se recuperar o investimento em um robô depende dos custos de compra, instalação, manutenção, e a produtividade obtida com o mesmo. E como um dos maiores benefícios do sistema desenvolvido neste trabalho é em relação ao seu baixo custo de sua implementação, vale ressaltar que o uso de um manipulador remanufaturado que não utiliza mais linguagem de programação proprietária passou por um processo que o torna totalmente intercambiável entre outros robôs que possuam esta mesma configuração, ou seja, 5 graus de liberdade. A inclusão do sistema de visão de baixo custo através de uma *WebCam*, se justifica, uma vez que, não seria economicamente viável utilizar um sistema usual industrialmente, que possui custos elevados em um manipulador que pode ser considerado pela indústria como ultrapassado. Foi possível comprovar que o manipulador robótico utilizado neste trabalho apresenta excelentes resultados para o que foi proposto, e que para o âmbito acadêmico, atende as necessidades.

Manipuladores com menos de 6 graus de liberdade não podem atingir posições e orientações arbitrárias no espaço tridimensional. O acréscimo de graus de liberdade pode reduzir significativamente o desempenho de um robô: em geral, quanto mais graus de liberdade existir num braço de robô, menor será a capacidade de carga útil; menores velocidades poderão ser atingidas; maiores serão os erros de posicionamento; e mais alto será o seu custo. No caso do ASEA possuir cinco eixos, sendo três eixos no corpo e dois no punho, avaliou-se a trajetória que o mesmo irá realizar. Nesse caso, utilizado para soldas planas, independente da geometria a ser utilizada o mesmo apresenta resultados satisfatórios.

Precisão em um nível adequado para processo de soldagem, o sistema apresentou como resultado um bom nível de precisão adequado para tal operação, pois proporcionou cordões totalmente retilíneo. Com o uso do robô de cinco eixos o ângulo de ataque pode ser corrigido deixando seu último eixo perpendicular a mesa e girando-o em relação ao ângulo necessário obtido pela inclinação da reta, o que proporcionou uma boa localização do cordão, e consequentemente uma penetração satisfatória.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LRSS (Laboratório de Robótica Simulação e Soldagem) da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), por disponibilizar todos os recursos e infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, M.P.; Caner, E.S.; Mello, A. G.; Albuquerque, M.P., *Análise de Imagens e Visão Computacional*, CBPF, 2012.
- ARTSOFT. Mach 3 CNC Controller: Software Installation and Configuration. ArtSoft: USA, 2007.
- ASEA, Product Manual, CK 09-1510E. Janeiro, 1984.
- Avcibas, I.; Sankur, B.; Sayood, K. Statistical Evaluation of Image Quality Measures. *Journal of Electronic Imaging*, 11:206-223, 2002.
- Barequet, Gill; Har-Peled, Sarel, "Efficiently approximating the minimum-volume bounding box of a point set in three dimensions", *Journal of Algorithms* 38 (1): 91–109, 2001.
- Bomfim, M.H.S., Projeto de um gabinete de controle com interface USB para robôs de até seis graus de liberdade. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica. UFMG. Belo Horizonte, 2009, 46 p., 2013.
- Canny, J. F. A computational Approach to Edge Detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6). p. 679-689, 1986.
- Chapman, S. J. Programação em MatLab para Engenheiros. 2ª edição. São Paulo: Editora CENGAGE, 2011, pp. 38-251.
- Corke, P.; Hutchinson, S.; Hager, G., A Tutorial on Visual Servo Control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, U.S.A. v. 12, n. 5, p. 651-670, Outubro, 1996.
- Craig, J. J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 2ª edição. São Paulo: Editora Addison-Wesley Publishing Company, 1989, pp. 1-144.
- Feliciano, F. F.; Souza, I. L.; Leta, F. R., Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações Sobre sua Exatidão. *Engvista*, V.7, n. 2, p.38-50, Dezembro, 2005.
- Foresti, R. L, Sistema de Visão Robótica para Reconhecimento de Contornos de Componentes na Aplicação de Processos Industriais. Dezembro, 2006.
- Gonzalez, R. C. ; Woods, R. E.; Eddins, S., *Digital Image Processing Using MatLab*. New Jersey: Prentice Hall, 609 p. 2004.
- Grassi, M.V., Desenvolvimento e Aplicação de Um Sistema de Visão para Robô Industrial de Manipulação. UFRGS. Porto Alegre, 2005.
- Heikkilä, J., Silvén, O., A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)*, San Juan, Puerto Rico, pp. 1106-1112, 1997.
- Herbst, E., Camera Calibration by Corners Detection, 2003. <http://www.tjhsst.edu/~eherbst/techlab/>. Disponível em 01/05/2015.
- Lenz, R.; Tsai, R.Y., A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics hand/Eye Calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, U.S.A. v. 5, n. 3, p. 345-358. Junho, 1989.
- Lopes, G.C., Autocalibração de um Braço Robótico Utilizando Acelerômetros. DEMEC, UFMG. Belo Horizonte, Dezembro, 2015.
- Russ, John. C. - *The Image Processing Handbook the Fifth edition*. CRC Ed. Boca Raton, FL, 2007.
- Vianna, M. E., *Calibração de Sistemas de Visão Computacional para Aplicação em Automação e Robótica*. Belo Horizonte, 2009.

ROBOTIC MANIPULATOR REMANUFACTURED GIFETD VISION SYSTEM FOR WELDING APPLICATION

Alexandre Queiróz Bracarense¹

Fagner Guilherme Ferreira Coelho¹

Eduardo José Lima II¹

Marcelo Henrique Souza Bomfim¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil

Abstract: *The increasing use of vision systems in automated processes is growing every day. And to simulate this situation in university, this paper proposes to add a low cost vision system to a remanufactured manipulator, which works reliably and algorithms that require minimal operator intervention, will allow the robotic manipulator perform welds arc from the identification, location and orientation of a workpiece on a table without requiring any prior knowledge or other type of sensor that assists. After image acquisition by the vision system, it is converted into points of transformation between the coordinate reference systems of the image plane and the world reference, thereby allowing the proposed method presents a picture as an input to the robotic manipulator define its path and perform the welding operation on coordinates obtained by processing the captured image. The main focus of this research is to check not only the fulfillment of the task of positioning, as well as the robustness against the environment variations, demonstrating that the system presents an excellent value for money.*

Keywords: *Computer Vision, Low Cost, Robotic, Welding*