

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Caracterização 3D de Superfícies Metálicas por Meios Ópticos

AUTORES:

Mauricio Edgar Stivanello, Luiz Henrique Vieira, Renata Faraco Cunha, Alisson Suzzim Calgaroto, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Marcelo Ricardo Stemmer

INSTITUIÇÃO:

PGEAS – Departamento de Automação e Sistemas / CTC / Universidade Federal de Santa Catarina

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor (es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor (es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Caracterização 3D de Superfícies Metálicas por Meios Ópticos

Abstract

The demand for inspection and repair of submerged metal structures has motivated the development of specific purpose autonomous robots. In this work the development of a 3D measurement system that aims to guide a robotic arm during submerged welding is presented. The design and implementation of hardware and software is described. The effectiveness of the developed system is demonstrated by an evaluation of the obtained results.

Introdução

A atividade de inspeção e reparo de estruturas submarinas é de fundamental importância para a indústria de petróleo e gás. No caso de linhas de transmissão de fluidos, por exemplo, procura-se identificar e eliminar trincas, amassamentos, perda de espessura, dentre outros defeitos. Visto que muitas das estruturas utilizadas são de metal, reparos por solda são muito empregados. A realização de solda submersa, porém, apresenta uma série de dificuldades tais como operação em área classificada, ambiente molhado e com presença de hidrocarbonetos.

Pelas dificuldades encontradas na intervenção local manual surge a necessidade de desenvolvimento de sistemas robotizados capazes de realizar os procedimentos de reparo e inspeção nestas condições. A orientação destes sistemas é normalmente realizada pela utilização de imagens bidimensionais fornecidas por um sistema de visão composto por câmeras de vídeo. Para algumas aplicações específicas, entretanto, faz-se necessário obter informação tridimensional da estrutura que está sendo reparada ou inspecionada. Este é o caso de solda robotizada, onde se faz necessário calcular a trajetória espacial a ser seguida pelo braço robótico durante a sua operação.

No presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de medição 3D, destinado a orientar a operação de manipuladores robóticos em atividades de solda. Este trabalho está sendo desenvolvido no contexto de um projeto que tem como objetivo desenvolver uma unidade de processamento para reparos por solda em ambiente submerso. O sistema de medição descrito, que neste primeiro momento opera em ambiente seco, está servindo como base experimental para o desenvolvimento de uma versão submergível. A versão final será responsável pela obtenção dos parâmetros utilizados no cálculo de trajetórias para furação, usinagem, fresamento e inserção de pinos por atrito.

Inicialmente são discutidas diferentes abordagens e conceitos básicos presentes em sistemas de medição 3D empregando laser. Na sequência é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema apresentado. Em seguida são expostos os resultados e uma avaliação do sistema desenvolvido. Finalmente, são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

Medição de Forma 3D por Meios Ópticos

Os sistemas de medição 3D são dispositivos que caracterizam a forma tridimensional de objetos ou ambientes. Estes sistemas podem seguir abordagens por contato ou sem contato. Da classe de métodos sem contato destaca-se a utilização de meios ópticos, que apresenta como vantagens ser pouco invasiva, operar a alta velocidade, gerar grande volume de dados e apresentar níveis de incerteza excelentes. Mais especificamente, a utilização de laser apresenta vantagens adicionais como montagem compacta, baixo consumo, comprimento de onda de isolamento fácil e ausência de aberrações cromáticas.

Na Figura 1 é apresentada a geometria básica de um sistema de medição 3D por triangulação laser [1]. Nesta configuração um projetor de folha laser é posicionado a uma distância b , ou linha de base, do centro de projeção de uma câmera pinhole. Assume-se o centro de projeção da câmera como a origem do sistema de coordenadas XYZ , em que todas as medições do sistema são expressas. O eixo Z e o eixo óptico coincidem. Os eixos y e Y , x e X , são respectivamente paralelos, mas apontam para direções opostas. f corresponde ao comprimento focal. O projetor emite um plano luz perpendicular ao plano XZ e formando um ângulo controlado, θ , com o plano XY . O eixo Y é paralelo ao plano de luz e perpendicular à página, de modo que somente o perfil do plano de luz é exibido. A intersecção do plano de luz com as superfícies da cena é uma curva planar denominada plano laser.

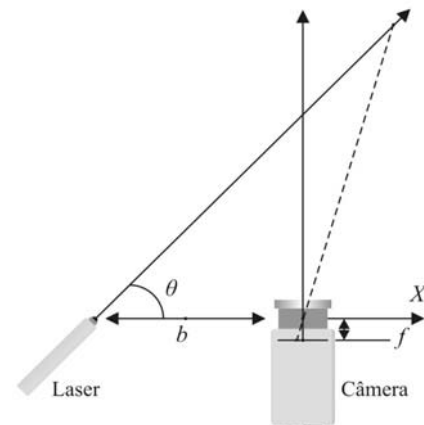


Figura 1: Configuração laser básica

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{b}{f \cot \theta - x} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Equação 1

Nesta configuração básica, as coordenadas de um ponto $P = [X, Y, Z]^T$ do feixe são estimadas pela Equação 1. Ao aplicar esta equação para todos os pontos visíveis da folha de laser obtém-se um perfil do objeto. Alterando-se a posição do plano de luz sobre o mensurando e repetindo o cálculo da transformação de coordenadas para cada ponto visível, obtém-se a forma 3D do mensurando.

Este modelo básico pode ser adaptado para diferentes configurações. Existem casos onde o emissor laser é deslocado linearmente [2]. Em outros casos o mensurando é rotacionado por uma mesa giratória [3]. Existem ainda casos onde o mensurando é deslocado diante do sistema de medição por uma esteira [1]. Para cada uma destas situações, entretanto, a transformação de coordenadas deve ser adaptada de modo a considerar o tipo de deslocamento realizado.

Descrição do Sistema Desenvolvido

Nas seções seguintes são descritas as abordagens utilizadas para resolver os diferentes problemas relacionados ao desenvolvimento de um sistema de medição 3D por laser.

Configuração do Sistema

O sistema aqui descrito foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar estruturas metálicas. Os principais requisitos que orientaram o projeto foram a necessidade de medição a uma distância aproximada de 500 mm e a impossibilidade de deslocar o sistema ou o mensurando durante a medição.

Uma imagem do sistema desenvolvido e uma ilustração simplificada da sua configuração são apresentadas na Figura 2. O sistema é composto basicamente por uma câmera de vídeo, um projetor de folha laser e um sistema de atuação. A câmera de vídeo é conectada ao computador através de uma placa de aquisição. O projetor de laser encontra-se direcionado a um espelho que está acoplado a um servo motor. Tanto a emissão da luz como o funcionamento do servo motor são realizados através de

uma placa de controle, que por sua vez encontra-se conectada a um computador através da interface USB.

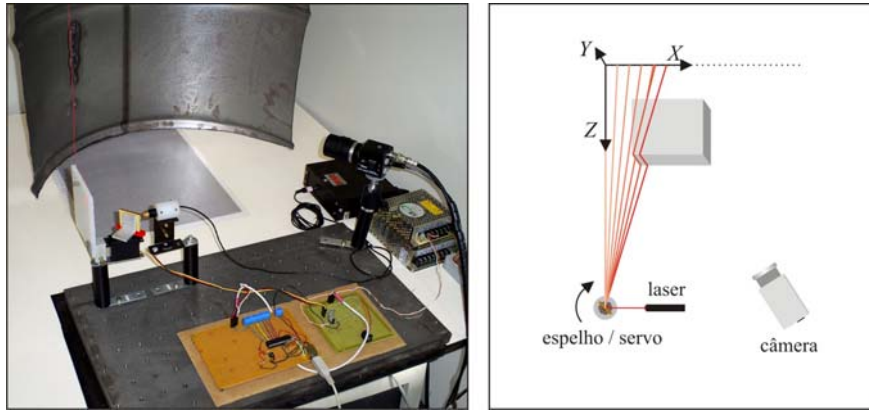


Figura 2: Configuração básica do sistema

Através desta montagem é possível direcionar a folha de luz ao longo do eixo X apenas alterando a orientação do espelho. Para uma dada orientação, o projetor laser emite uma folha de luz na direção do espelho, que por sua vez reflete a folha em direção ao mensurando. A câmera, em ângulo, captura uma imagem com a presença da linha formada pela intersecção da folha de luz com a superfície do objeto. As distorções observadas na extensão desta linha são interpretadas como variações de distância. Pelo direcionamento da folha laser sobre toda a extensão do mensurando e pela repetição do processo de avaliação da linha laser são obtidos vários perfis que, unidos, fornecem uma descrição 3D do objeto.

Procedimento de Calibração

A principal questão a ser tratada em um sistema como o apresentado se refere à transformação das coordenadas 2D da imagem em coordenadas 3D do ambiente. Como apresentado na Equação 1, esta transformação é possível uma vez que se tenha estimados f , b e θ . Entretanto, parâmetros como o ângulo ou distância entre a câmera e o laser são difíceis de medir. Pequenos erros angulares ou de distância podem levar a grandes erros de medição. Embora alguns trabalhos empreguem a estimação destes parâmetros através de uma calibração geométrica [2], é bastante comum a utilização de uma calibração direta. Na calibração direta são estimadas curvas que relacionam diretamente deslocamentos da linha laser na imagem com deslocamentos na unidade do mensurando.

No presente trabalho foi adaptado um método de calibração direta onde é estimada uma matriz de transformação geométrica M_{cl} que reprojeta qualquer ponto do plano de imagem para o plano da folha laser [3]. Segundo esta abordagem, podemos descrever a transformação entre pontos correspondentes do plano da imagem e do plano laser como:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2}$$

onde $Y_1 = U/W$ e $Z_1 = V/W$.

Reescrevendo $U - Y_1 W = 0$, $V - Z_1 W = 0$, e definindo M_{33} como 1 obtemos:

$$Y_1 = M_{11} X_c + M_{12} Y_c + M_{13} - Y_1 M_{31} X_c - Y_1 M_{32} Y_c \quad \text{Equação 3}$$

$$Z_1 = M_{21} X_c + M_{22} Y_c + M_{23} - Z_1 M_{31} X_c - Z_1 M_{32} Y_c \quad \text{Equação 4}$$

Conhecendo mais do que quatro pontos correspondentes entre o plano de imagem e o plano laser, podemos estimar os oito parâmetros da matriz M_{cl} através do método de mínimos quadrados.

Com base na transformação de coordenadas descrita, foi desenvolvido um algoritmo de calibração composto por dois passos principais. Num primeiro instante, os coeficientes que descrevem a distorção radial da câmera são estimados [4]. Desta forma, sobre todas as imagens capturadas é aplicada a transformação necessária para a correção deste tipo de aberração.

Num segundo passo, realiza-se a estimação da matriz de transformação M_{cl} . Para obter os pontos correspondentes necessários ao procedimento, é utilizado o gabarito de calibração plano apresentado na imagem exibida na Figura 3. Este gabarito consiste em uma impressão sobre um papel de alta qualidade, fixado sobre uma lâmina de vidro plana e rígida. O padrão presente no gabarito consiste em um tabuleiro, organizados de maneira que os vértices formados pela junção dos mesmos sejam facilmente detectáveis. Durante o procedimento de calibração, as coordenadas 3D dos vértices internos refletem a distância em milímetros em relação ao vértice inferior direito. Adicionalmente, é utilizada uma linha de referência na base de medição, paralela ao eixo X .

No momento da calibração, para uma dada orientação do espelho, alinha-se o gabarito da melhor forma possível ao plano da folha laser. Adicionalmente, é realizado um alinhamento de forma que o primeiro vértice interno do gabarito, partindo do canto inferior direito, esteja alinhado com a linha de referência na base de medição. Realizados estes alinhamentos, uma imagem é capturada pela câmera. Nesta imagem são identificadas as coordenadas 2D dos pontos de cada um dos vértices internos presentes no padrão do gabarito. Para cada um destes pontos são associadas as respectivas coordenadas 3D. As coordenadas do eixo X são definidas como 0 neste momento, visto que uma normalização de coordenadas será realizada no momento da medição para compensar as diferentes orientação do espelho. Fazendo uso destes pontos correspondentes e do relacionamento descrito pela Equação 3 e pela Equação 4 é organizado um sistema de equações lineares, que sendo resolvido através do método de mínimos quadrados, fornece a estimação dos parâmetros da matriz M_{cl} .

Através do procedimento descrito é possível realizar a calibração para uma das possíveis orientações do espelho. Entretanto, observa-se que a geometria que relaciona o plano da folha laser com o plano de imagem é diferente para cada orientação possível. Temos que o deslocamento não linear do plano laser exige uma calibração para todas as orientações desejadas, como ilustrado na Figura 3(a).

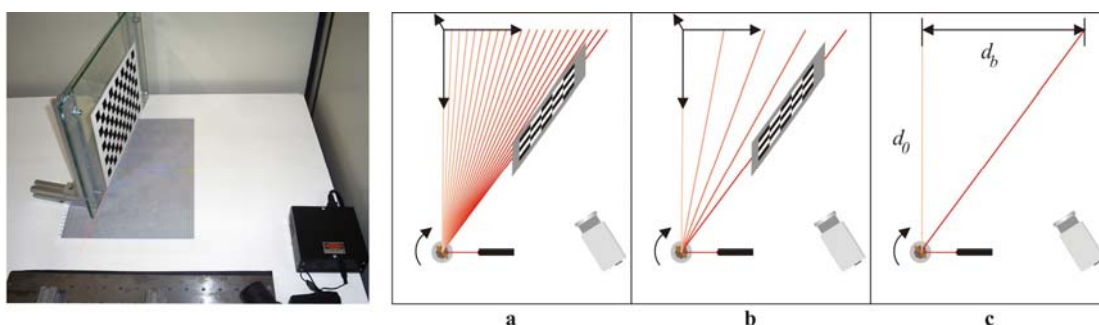


Figura 3: Etapas de calibração

Uma calibração deste tipo mostra-se extremamente trabalhosa. Por este motivo, um procedimento de calibração através de interpolação foi desenvolvido. Neste procedimento, ilustrado na Figura 3: Etapas de calibração (b), para apenas algumas das orientações do espelho é apresentado o gabarito. Das imagens obtidas destas posições de referência são levantadas as coordenadas dos pontos 2D correspondentes aos vértices do padrão. As coordenadas dos pontos associados a cada um dos vértices nas diferentes orientações são organizadas em conjuntos. Estes conjuntos são utilizados para estimar

as coordenadas no plano de imagem dos vértices correspondentes nas outras orientações do espelho, através do método de interpolação de Lagrange. Tendo em mãos as coordenadas 2D dos vértices para todas posições possíveis, são associadas as respectivas coordenadas 3D e finalmente são calculadas matrizes de transformação M_{cl} para cada orientação do espelho.

Adicionalmente, no momento da calibração é calculada a distância d_0 entre o projetor laser e a origem do sistema de coordenadas do ambiente. Este valor é utilizado, em conjunto com a informação do passo angular pa do projetor laser, na normalização das coordenadas estimadas no momento da medição. Para calcular este valor, é seguido um procedimento simples, ilustrado na Figura 3: Etapas de calibração (c). A orientação do espelho é alterada da posição inicial até a última posição de medição, contando-se o número de passos np necessários. A distância d_b entre a intersecção do plano laser na última posição ao eixo X e a origem é medida utilizando uma régua ou paquímetro. Após este procedimento, calcula-se d_0 como $d_0 = d_b / \text{tg}(np \cdot pa)$.

Procedimento de Medição

Na etapa de medição é realizada a estimação de pontos tridimensionais do mensurando utilizando-se dos parâmetros obtidos no momento da calibração. Inicialmente, faz-se necessário identificar os pontos na imagem correspondentes à linha gerada pela intersecção da luz laser na superfície do mensurando. Em seguida, realiza-se a transformação das coordenadas 2D destes pontos em coordenadas 3D do ambiente.

Para a identificação da linha laser na imagem foi desenvolvido um algoritmo cujos passos são ilustrados na Figura 4, e que combina extração por subtração de imagens, limiarização e cálculo do centro de gravidade. No início do procedimento de medição é capturada uma imagem de referência sem a emissão do laser. Para cada passo de medição, associado a cada orientação do espelho, uma nova imagem é capturada com a emissão do laser. Uma operação de subtração de intensidades é realizada entre as imagens de cada passo e a imagem de referência. Desta operação será obtida uma imagem onde a intensidade dos pontos pertencentes à linha laser estará destacada do resto da imagem. Uma operação de limiarização global é suficiente para binarizar a imagem. Finalmente, faz-se para cada linha a seleção exata do centro do feixe laser através do cálculo do centro de gravidade [5].

Identificados os pontos da linha laser, para uma dada orientação do espelho, é possível estimar as coordenadas dos pontos correspondentes no ambiente com base na matriz de transformação associada à orientação corrente. Entretanto, dado o procedimento de calibração adotado, estas coordenadas estão em um sistema de coordenadas específico para cada orientação. Faz-se necessária, desta forma, uma normalização de modo a trazer as coordenadas dos pontos medidos em todas as orientações do espelho para um sistema de coordenadas comum, convencionado como sendo o sistema associado à orientação inicial.

Nesta normalização deve ser considerada uma rotação de $\theta = -pa \cdot i$ em torno do eixo Y , associada a orientação corrente do espelho. Adicionalmente, deve-se considerar uma translação em função das diferentes distâncias d_i entre o projetor laser e a intersecção do plano laser com a linha de referência associada ao eixo X , para cada orientação. Assim, a transformação que traz o ponto $P_i = [0, Y_i, Z_i, 1]^T$ no plano laser associado à orientação i do espelho para o ponto normalizado $P_n = [X, Y, Z, 1]^T$ no sistema de coordenadas compartilhado é dada por:

$$P_n = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & \sin \theta \cdot d_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & -\cos \theta \cdot d_i + d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5}$$

Resolvidas a identificação da linha laser e a normalização das coordenadas, podemos resumir o procedimento de medição pelo diagrama apresentado na Figura 5.

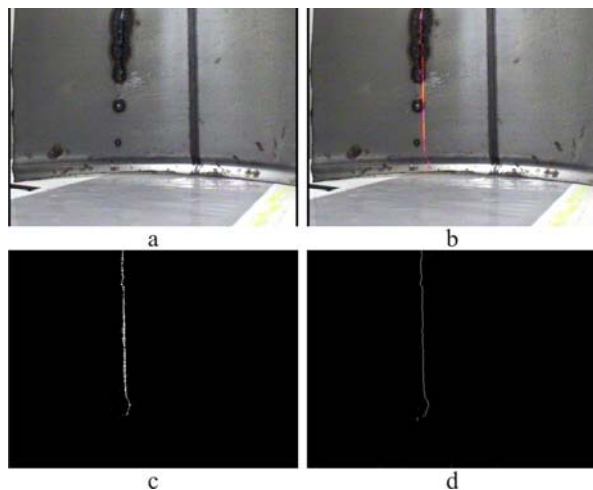


Figura 4: Extração de linha laser

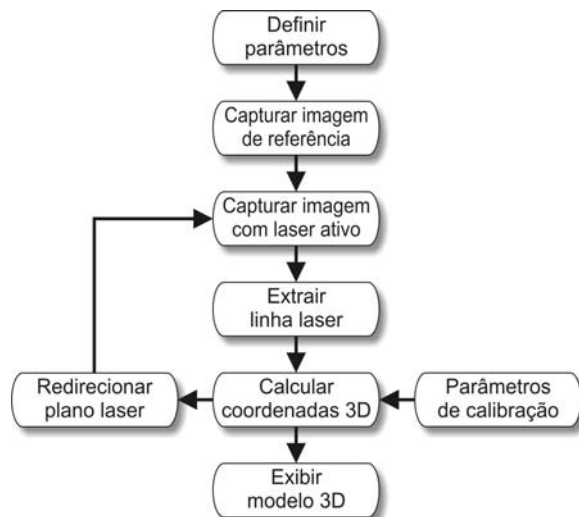


Figura 5: Fluxo de medição

Avaliação e Resultados Experimentais

Na Figura 6 é apresentado um modelo 3D uma peça metálica curva medida pelo sistema.

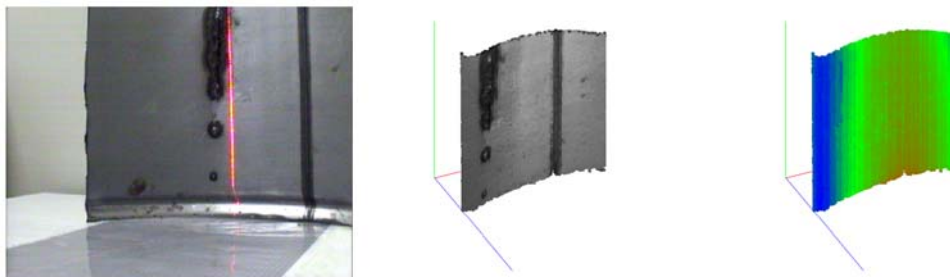


Figura 6: Medição de superfície metálica (40.000 pontos)

Através de uma avaliação visual considera-se que o sistema caracteriza satisfatoriamente a forma 3D de objetos e superfícies. Entretanto, uma avaliação objetiva faz-se necessária. Assim sendo, nas seções seguintes o sistema é avaliado sob diferentes critérios comuns à área de metrologia [6].

Erro, Sensibilidade e Repetitividade

Na configuração adotada, a sensibilidade de medição em todas as direções é afetada pela imagem em perspectiva obtida pela câmera. Exemplificando esta característica, no gráfico da Figura 7 é apresentada a curva que caracteriza a relação entre variações de distância ao longo do eixo Z e variações da posição no seu eixo correspondente na imagem. Adicionalmente, para uma distância de 500 mm e uma linha de base de aproximadamente 300 mm, foi calculada uma resolução espacial de 1,14 mm.

Na Tabela 1 são apresentados os erros médios de 5 amostras na medição de distância para diferentes posições, para os casos de calibração manual e interpolada. Observa-se que o erro médio máximo obtido para uma calibração manual foi de 0,25% da distância medida. Para o caso de uma calibração interpolada, foi obtido o erro médio máximo de 0,53%. Apesar de apresentar um erro médio maior, uma calibração interpolada pode mostrar-se mais interessante para os casos onde uma grande precisão não seja necessária.

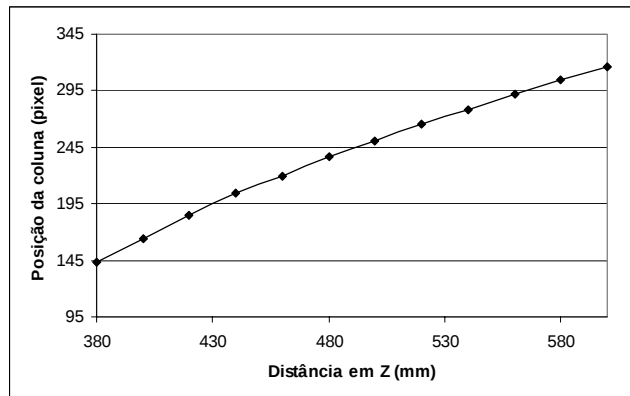


Figura 7: Estímulo / Resposta

<i>Distância</i>	<i>Manual</i>	<i>Interpolada</i>
400	0,89	0,46
450	0,48	1,46
500	1,23	2,67
550	0,27	2,31
600	0,65	1,19
650	0,05	0,09

Tabela 1: Erro Médio de Medição (mm)

Pela realização de procedimento onde o anteparo plano foi medido 12 vezes em uma mesma posição, foi avaliada a variação do resultado da medição. Para uma distância de 550 mm, que corresponde a distância média da faixa de interesse, foi estimada uma repetitividade de 1,31 mm.

Incerteza da medição

O resultado de medição é influenciado por diversas fontes de incerteza. Considera-se que as principais

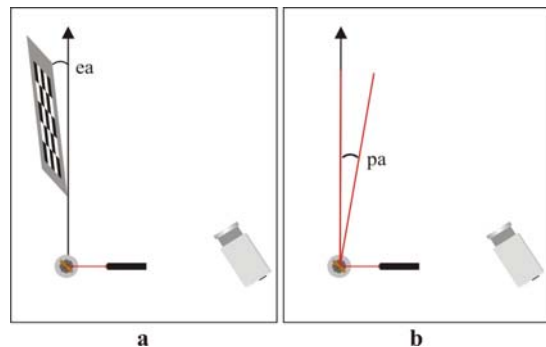


Figura 8: Incertezas de medição

fontes presentes no sistema sejam a repetitividade, a resolução, o erro associado à inclinação do gabarito na calibração e o erro associado ao reposicionamento da folha laser ao longo do mensurando.

A fonte de incerteza associada à inclinação do gabarito na calibração é ilustrada na Figura 8 (a), e corresponde a um erro de alinhamento entre o gabarito e o feixe de luz. O erro E_c associado a esta fonte foi calculado por

$$E_c = l_g - (\cos(ea) \cdot l_g), \text{ onde } l_g \text{ corresponde a}$$

largura do gabarito e ea corresponde ao erro máximo de alinhamento esperado. Empregando um gabarito de largura igual a 280 mm e considerando um erro máximo de alinhamento igual a 2° , obteve-se $E_c = 0,17$ mm.

Outra fonte de incertezas está relacionada à forma com que a folha de luz é deslocada sobre o mensurando. Como ilustrado na Figura 8 (b), podemos observar como a resolução ao longo do eixo X diminui à medida que o ponto medido se distancia do sistema. O erro E_l associado a esta fonte foi calculado como $E_l = d_m \cdot \tan(pa)$, onde d_m corresponde a distância de medição e pa corresponde ao passo angular do projetor laser. Para $pa = 0,1698^\circ$ e $d_m = 500$ mm, obteve-se $E_l = 1,47$ mm.

Finalmente, para o cenário descrito obteve-se uma incerteza de medição expandida igual a 2,0 mm. Para este resultado, considerou-se que a influência do operador já estejam embutidos na própria

repetitividade. Adicionalmente, considera-se que os efeitos de variações na temperatura possam ser desconsiderados.

Conclusões e Perspectivas

No presente trabalho foi descrito o desenvolvimento de um sistema medição de formas 3D baseado em laser. Para tal, módulos de hardware e de software foram projetados e implementados. A combinação da configuração de hardware e do conjunto de algoritmos de calibração e medição utilizados permitiu medições sem a necessidade de deslocamento do sistema ou do objeto medido e a obtenção de modelos 3D com alta densidade de pontos, permitindo uma caracterização detalhada do mensurando.

Os níveis de incerteza alcançados mostram-se suficientes para um grande número de aplicações. Além disso, durante a avaliação do sistema observou-se que as fontes de incertezas que mais contribuem para o erro de medição são a rotação do espelho e a resolução espacial. O uso de um sistema de rotação com passo angular menor e uma câmera com maior resolução deve ser suficiente para melhorar significativamente o resultado obtido.

Para trabalhos futuros, considera-se a utilização de uma segunda câmera com o objetivo de eliminar regiões oclusas. A utilização de elementos difrativos ópticos que projetem múltiplas linhas laser, que permitam eliminar todas as partes móveis do hardware e que possibilitem a captura de toda uma região da superfície através de uma única aquisição de imagem também é considerada.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP (PRH-34-ANP/MCT).

Referências Bibliográficas

- [1] Trucco, E. e Verri, A. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, 1 ed., Prentice Hall, 2003.
- [2] Acosta, D., Garcia, O. Aponte, J. *Laser Triangulation for Shape Acquisition in a 3d scanner plus scan*, *Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics*, Vol. 2, pp. 14–19, 2006.
- [3] Saint-Marc, P., Jezouin, J. L. e Medioni, G. *A Versatile Pc-based Range Finding System*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7(2): pp. 250–256, 1991.
- [4] Zhang, Z. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, pp. 4, 2000.
- [5] Buschinelli, P. D. V. *Desenvolvendo de um sistema Óptico por triangulação cônica para inspeção do perfil interno de dutos*, *Dissertação de Mestrado*, UFSC, 2007.
- [6] Albertazzi, A. G. e de Sousa, A. R. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*, Editora Barueri, 2008.