

VERIFICAÇÃO METROLÓGICA DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PERPENDICULARIDADE PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS INDUSTRIAIS

LUÍS F. F. FURTADO⁽¹⁾, EMILIA VILLANI⁽¹⁾, RICARDO SUTÉRIO^(1,2)

⁽¹⁾ *Centro de Competência em Manufatura, Depto. de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica*

*Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias
CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil
E-mails: furtado@ita.br, evillani@ita.br*

⁽²⁾ *Laboratório de Integração e Testes, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

*Avenida dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja
CEP 12.227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil
E-mail: suterio@lit.inpe.br*

Abstract— This paper presents the metrological verification of a system for measuring perpendicularity, which should be used to correct the orientation of an End-Effector of drilling and insertion of fasteners during the aviation airframes assembly. This work is a contribution to the development of a national solution for automation of Brazilian aeronautics industry. The article evaluates the proposed solution considering two methods to estimate the orientation of the End-Effector. The first method is based on trigonometry and considers only the result of 2 of the 4 sensors system. The second method is based on analytic geometry and considers the outcome of the 4 sensors simultaneously. The results showed that the first method does not meet the design requirements. The second method meets the requirements if implemented together with a orientation interactive correction.

Keywords— metrological verification, industrial robots, perpendicularity.

Resumo— Este artigo apresenta a verificação metrológica de um sistema de medição de perpendicularidade, que deve ser utilizado para corrigir a orientação de um efetuador de furação e inserção de rebites, durante o processo de junção de fuselagens aeronáuticas. Este trabalho é uma contribuição para o desenvolvimento de uma solução nacional de automação para indústria aeronáutica brasileira. O artigo avalia a solução proposta considerando dois métodos para estimação da orientação do efetuador. O primeiro método é baseado em trigonometria e considera apenas o resultado de 2 dos 4 sensores do sistema. O segundo método é baseado em geometria analítica e considera o resultado dos 4 sensores simultaneamente. Os resultados obtidos permitem concluir que o primeiro método não atende os requisitos de projeto. O segundo método atende os requisitos se for implementado juntamente com um processo de correção de orientação interativo.

Palavras-chave— verificação metrológica, robôs industriais, perpendicularidade.

1 Introdução

Os robôs industriais são amplamente utilizados nas indústrias de manufaturas automotivas, eletrônicas, farmacêuticas, alimentícias, entre outras (HOLLAND; NOF, 1999). Entretanto, a penetração destes robôs na indústria aeronáutica ainda não é tão grande e um dos principais fatores é a pouca exatidão de posicionamento e orientação dos manipuladores robóticos de cadeia aberta (SUMMERS, 2005).

A montagem estrutural de aviões tem sido feita de forma manual na indústria brasileira deste o seu início. Isto acontece, pois as máquinas dedicadas a estas atividades representam um alto investimento, geralmente conflitante com as possibilidades da indústria de produção nacional. Geralmente estas máquinas não são flexíveis, o que dificulta sua reutilização quando o produto é alterado.

Existem alguns trabalhos relativos à automação flexível da montagem de estruturas aeronáuticas com manipuladores robóticos industriais – como os de Cibiel e Prat (2006), Kihlman (2005) e Devlieg et al.

(2002) – que indicam que as principais dificuldades encontradas para o uso de robôs no setor aeronáutico são a exatidão de posicionamento, a rigidez do robô durante os esforços de furação e as limitações de dimensão e massa do *end-effector*, devido às limitações de carga do robô.

Sistemas de visão fixados no último elo do robô são soluções empregadas em muitas aplicações industriais e apresentam resultados satisfatórios para a correção de posicionamento (HUTCHINSON et al., 1996). Entretanto, os sistemas de visão limitam-se a corrigir as coordenadas de orientação dos manipuladores apenas em superfícies simples, onde é possível aplicar uma pintura xadrez para referência (MENG; ZHUANG, 2007). Mas as superfícies de estruturas aeronáuticas não são planas ou regulares, o que faz com que o uso de sistemas de visão para medição de orientação seja de difícil aplicação.

Em sua maioria, os sistemas de visão determinam os desvios a partir de um referencial e enviam um valor de incremento de posição para o robô. Para medir a posição e orientação absoluta do último elo do robô é necessário um sistema de medição de grandes volumes. Esta estratégia passou a

ser aplicada nos últimos anos com o avanço desta tecnologia metrológica e apresenta bons benefícios.

Kihlman e Loser (2003) propõem a utilização de um Laser Tracker para fechar uma malha de controle de posicionamento utilizando como dado de entrada a posição da ferramenta robótica que é obtida a partir do sistema de medição de grandes volumes. Outra solução é o uso de um sistema de fotogrametria para corrigir a posição absoluta do robô (SUMMERS, 2005).

Também é possível efetuar medições de grandes volumes com um sistema de medição que tem um princípio de funcionamento semelhante ao utilizado no sistema de posicionamento global (GPS). Ao invés de usar satélites em órbita, o sistema usa transmissores de luz que são posicionados em um ambiente. Esta tecnologia é conhecida como indoor GPS ou iGPS (ALMEIDA et al., 2008).

Neste contexto, este trabalho apresenta a verificação de um sistema de medição de perpendicularidade desenvolvido para uso em um efetuator robótico multifuncional que irá efetuar tarefas de furação, aplicação de selante e inserção de prendedores em estruturas aeronáuticas.

O sistema de medição de perpendicularidade visa assegurar que a perpendicularidade do robô esteja dentro das tolerâncias da indústria aeronáutica para furação de estruturas. Diferentemente das soluções apresentadas na literatura e baseadas em sistemas de medição de grandes volumes, esta é uma solução flexível e de baixo custo.

O efetuator ao qual o sistema de medição de perpendicularidade está integrado é o EFIP (Efetuator de Furação e Inserção de Prendedores). Este efetuator foi desenvolvido no Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte do Projeto AME (Automação da Montagem Estrutural de Aeronaves), um projeto inovador no contexto brasileiro.

2 Sistema de Medição de Perpendicularidade

2.1 Princípio de medição

O sistema de medição de perpendicularidade considerado neste trabalho é baseado num princípio semelhante ao adotado por Cibiel e Prat (2006), que propõem um sistema de medição de perpendicularidade integrado ao sistema de *clamp* do efetuator robótico. O *clamp* é uma força aplicada pelo robô que pressiona o efetuator robótico contra as chapas da fuselagem para diminuir a vibração local entre as chapas durante a furação, reduzir a formação de cavacos e permitir uma referência confiável entre o efetuator e a superfície da estrutura aeronáutica para o escariado (DEVLIEG; FEIKERT, 2008).

O sistema de medição utilizado tem seu projeto detalhado em Furtado, Villani e Sutério (2009) e é

ilustrado na Figura 1. Ele consiste basicamente de uma rótula que se acomoda na superfície quando a força de *clamp* é efetuada. A superfície da rótula (A) se acomoda à superfície aeronáutica, girando a rótula em relação ao restante do efetuator (B).

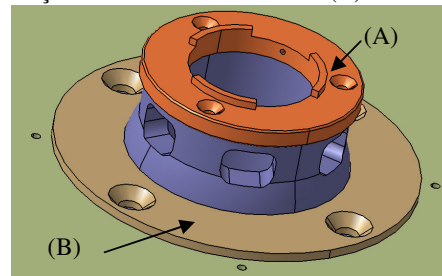


Figura 1. Rótula do sistema de medição de perpendicularidade (vista externa).

O valor do desvio linear resultante da acomodação é medido por quatro sensores e utilizado para cálculo do desvio de perpendicularidade. Os sensores são localizados na parte interna do sistema de medição de perpendicularidade, conforme ilustrado na Figura 2.

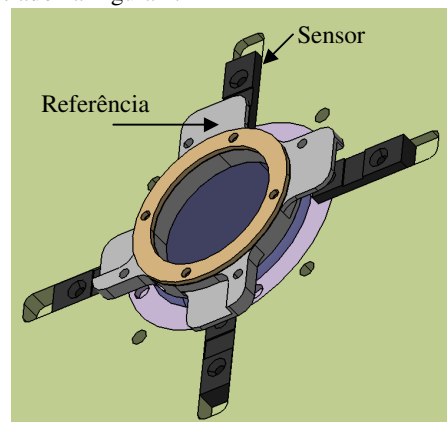


Figura 2. Rótula do sistema de medição de perpendicularidade (vista interna).

A rótula é equivalente a uma junta esférica, com três graus de liberdade, correspondentes às rotações em torno dos eixos X, Y e Z. No caso do sistema de medição de perpendicularidade, tem-se interesse apenas nas rotações em torno dos eixos X e Y. A rotação em torno do eixo Z (perpendicular à superfície) não tem efeito para a aplicação considerada, a furação e inserção de prendedores.

A verificação metrológica realizada avalia dois métodos matemáticos para o cálculo de desvio angular. Estes métodos são apresentados nas próximas seções.

2.2 Método trigonométrico

O primeiro método proposto é baseado na análise trigonométrica a partir dos valores de deslocamento medido por sensores lineares. Este princípio é ilustrado Figura 3. A Figura 3(a) considera a rótula na posição inicial, quando o valor da distância b é igual a zero. Em outro caso,

apresentado na Figura 3(b), existe um deslocamento angular θ e um desvio linear b proporcional. O valor da distância a representa o ponto de fixação dos sensores lineares.

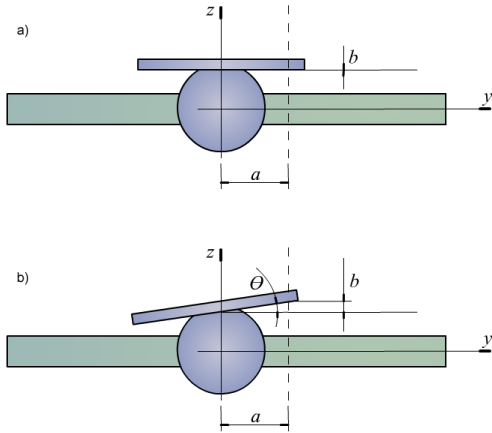


Figura 3. Deslocamento angular em torno do eixo X (FURTADO; VILLANI; SUTÉRIO,2009).

É possível determinar o valor do desvio angular θ com os catetos a e b do triângulo formado na Figura 3, como é mostrado na Equação 1.

$$\theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

2.3 Método baseado em geometria analítica

O segundo método proposto para calcular o desvio angular é baseado em geometria analítica para a obtenção de um vetor que indique o valor do desvio de orientação.

Enquanto o método anterior utiliza a medição de dois sensores lineares instalados ortogonalmente, este método necessita do valor obtido por pelo menos três sensores lineares.

Um plano de referência é apresentado na Figura 4, onde os três sensores de medição linear são representados pelas letras A, B e C. Neste caso os pontos A e B representam o local de fixação dos sensores e o ponto C é um ponto no terceiro quadrante.

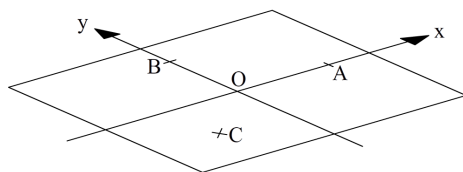


Figura 4. Plano com três pontos para o cálculo do desvio angular.

O primeiro passo é determinar dois vetores formados pelos três pontos. Neste caso as distâncias de fixação dos sensores em x e y são fixas e o valor da posição em z é representado pela leitura dos sensores. Assim, serão considerados os vetores \overline{AB} e \overline{AC} .

A Equação 2 apresenta o produto vetorial destes dois vetores que resultam em um vetor perpendicular ao plano de fixação dos sensores.

$$\overline{vp} = \overline{AB} \times \overline{AC} \quad (2)$$

Com o vetor perpendicular $\overline{vp}=(x, y, z)$ é possível calcular o desvio angular em x, chamado de R_x , indicado na Equação 3. Também é possível calcular o desvio angular em y (R_y) a partir da Equação 4.

$$R_x = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{y}\right) \quad (3)$$

$$R_y = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \quad (4)$$

Também existe a possibilidade de efetuar o cálculo de desvio angular com mais de três sensores, caracterizando redundância para redução de erros aleatórios. A Figura 5 apresenta um exemplo onde quatro sensores são instalados ortogonalmente A, B, C e D.

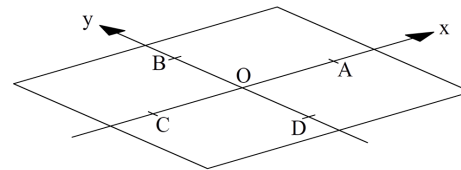


Figura 5. Plano com quatro pontos ortogonais para o cálculo do desvio angular.

Assim é possível fazer quatro combinações de produtos vetoriais e obter uma média dos desvios angulares de cada vetor. Os vetores $\overline{AB} \times \overline{AC}$, $\overline{BC} \times \overline{BD}$, $\overline{CD} \times \overline{CA}$ e $\overline{DA} \times \overline{DB}$ são exemplo de quatro combinações obtidas.

2.4 Seleção e posicionamento dos sensores

Os dois principais requisitos do sistema de medição de perpendicularidade para a aplicação proposta são: a exatidão e o range de medição.

A tolerância de perpendicularidade de um furo em uma estrutura aeronáutica é de $\pm 0,5^\circ$. Para tanto o sistema de medição de perpendicularidade deve ter uma exatidão mínima de $\pm 0,25^\circ$. Considerou-se para fins de projeto, uma exatidão desejada de $\pm 0,05^\circ$.

Quanto ao range de medição, este é influenciado por desvios de orientação do robô e deformações da fuselagem. Experimentos práticos indicam que um range de $\pm 5^\circ$ em relação à estrutura aeronáutica pode ser aceitável.

Com essas informações é possível determinar a máxima distância que o sensor deve medir (b_{MAX}), conforme a Equação (5), sendo que a distância a de fixação dos sensores (Figura 3) é de 35mm.

$$b_{MAX} = \pm a \cdot \text{tg} \theta_{MAX} \quad (5)$$

$$b_{MAX} = \pm 35 \cdot \text{tg}(5^\circ) \text{mm}$$

$$b_{MAX} = \pm 3,06 \text{mm}$$

Para que a exatidão do sistema permaneça em torno de $\pm 0,05^\circ$, a incerteza de medição (b_{MIN}) do sensor de deslocamento é dada pela Equação (6).

$$b_{MIN} = \pm a.tg\theta_{MIN} \tag{6}$$

$$b_{MIN} = \pm 35.tg(0,05^\circ)_{MIN}$$

$$b_{MIN} = \pm 30,5\mu m$$

Os sensores utilizados são sensores indutivos analógicos, do fabricante Turk, modelo Bi7-Q08-LiU, com 3mm de curso. A seleção destes sensores considerou a necessidade de redução de massa e peso do *End-Effector* e a facilidade de aquisição dos sensores em território nacional.

De acordo com o valor de b_{MAX} obtido a partir da Equação 5, são necessários dois sensores para medir $\pm 3,06mm$. Desta forma, para aumentar o campo de medição do deslocamento linear foram instalados dois sensores em desnível.

Na Figura 6 é possível observar esta fixação em desnível. No detalhe “a” a rótula está perpendicular, então os sensores 1 e 2 conseguem medir o dispositivo de estimulação dos sensores. Quando ocorre um decremento angular na rótula – detalhe “b” da Figura 6 o estimulador do sensor continua dentro do campo de medição do sensor 1, representado pela cor laranja, e sai da campo de atuação do sensor 2. Nos casos onde há incremento angular na rótula – detalhe “c” da Figura 6 - o estimulador do sensor passa a ficar dentro do campo de medição do sensor 2 e sai da área de reconhecimento do sensor 1.

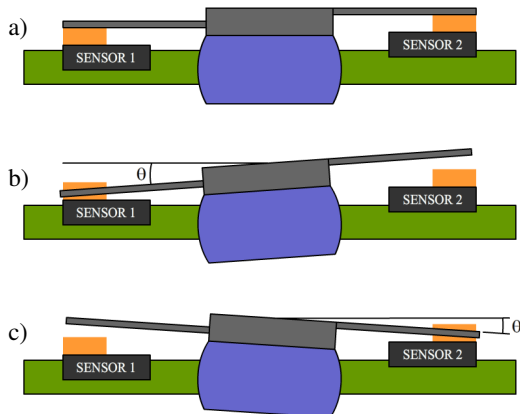


Figura 6. Instalação dos sensores em desnível.

3 Verificação Metrológica do Sistema de Medição de Perpendicularidade

A verificação metrológica do sistema de medição de perpendicularidade foi feita utilizando um sistema de medição de grandes volumes baseado no princípio de fotogrametria.

Este sistema de fotogrametria, chamado de K-Series, é conhecido como *Optical CMM (Optical*

Coordinate Measurement Machine – Máquina de Medição por Coordenadas Ópticas) e é composto por três câmeras que conseguem determinar a posição espacial de até 255 LEDs instalados no mensurando, e assim fazer o alinhamento do mesmo. Também é possível efetuar a medição com um dispositivo tridimensional próprio, chamado de *Probe*, que têm um apalpador e um conjunto de LEDs instalados estrategicamente (METRIS, 2005).

A exatidão deste equipamento é da ordem de 0,040 mm quando os LEDs estão instalados à 6m de distância das câmeras. Entretanto este valor tenta a ser menor quando os LEDs estão mais próximos (por volta de 2 m de distância) da câmera.

Para estimular um desvio angular na rótula, foi desenvolvido um dispositivo de calibração baseado em um disco com parafusos que permite o ajuste do ângulo aplicado de acordo com a posição dos parafusos. Este sistema permite a criação de 6 eixos de movimentação defasados 30° cada, incluindo as rotações em torno do eixo *x* e do eixo *y*.

Foram tomados 24 pontos em cada eixo de movimentação, totalizando 144 medições. A Figura 7 mostra a rótula e o dispositivo de calibração, usados no experimento realizado.

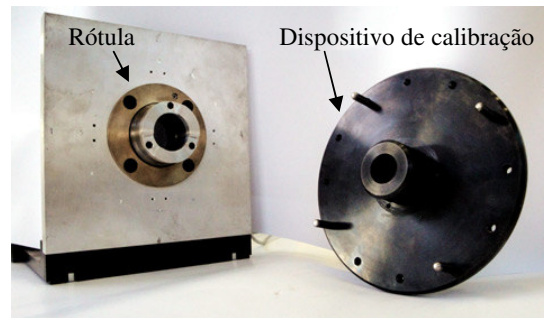


Figura 7. Experimento realizado.

3.1 Resultados com o método trigonométrico

A Figura 8 a seguir mostra o gráfico das medições em torno do eixo *x* onde os valores da abscissa são obtidos com o sistema de fotogrametria e os valores do eixo das ordenadas foram obtidos com o sistema de medição projetado.

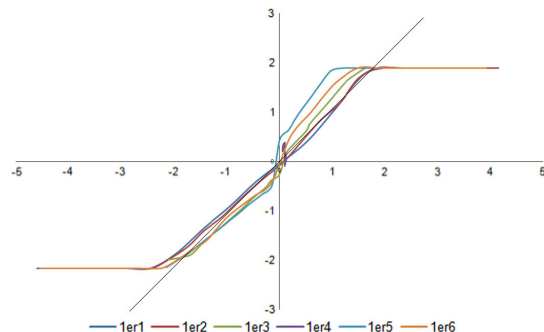


Figura 8. Medição para rotações em torno do eixo *x*.

O gráfico das medições em torno do eixo y é apresentado a seguir na Figura 9.

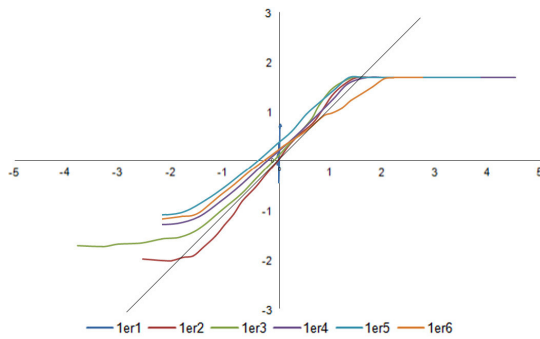


Figura 9. Medição para rotações em torno do eixo y.

Os valores de desvio angular são medidos utilizando apenas um sensor linear por vez e não levam em consideração que o desvio angular em outro eixo pode influenciar a medição. Por exemplo, um desvio angular somente em torno do eixo x também afeta a saída dos sensores que medem o eixo y.

A Tabela 1 a seguir mostra os valores da incerteza de medição para ângulos menores que 1°, menores que 2° e para todo o range de medição.

Tabela 1. Incertezas de medição para o método trigonométrico.

Ângulos menores que 1°		Ângulos menores que 2°		Todo o range de medição	
rx	ry	rx	ry	rx	ry
0,174°	0,276°	0,446°	0,565°	1,399°	1,339°

3.2 Resultados com o método por geometria analítica

A vantagem do uso deste método ficou evidente pois para formar cada vetor são necessários pelo menos três sensores de medição linear. Desta forma, a interferência que não era percebida pelo método de cálculo anterior passou a ser considerada.

Os resultados foram obtidos utilizando os quatro sensores de medição e obtendo a média dos quatro produtos vetoriais. A Figura 10 a seguir apresenta o desvio angular obtido em torno do eixo x.

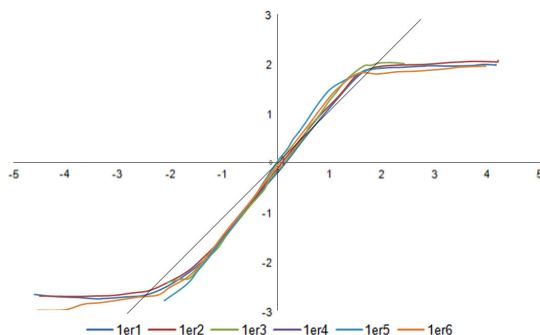


Figura 10. Medição para rotações em torno do eixo x.

O resultado das medições em torno do eixo y é apresentado no gráfico da Figura 11.

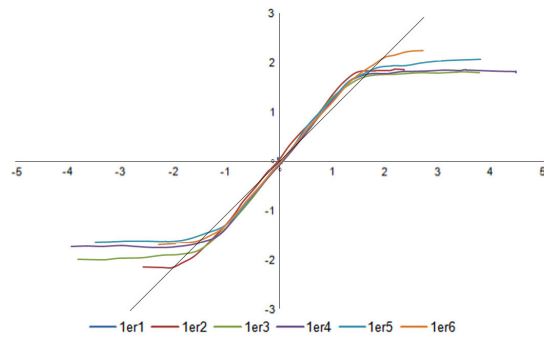


Figura 11. Medição para rotações em torno do eixo y.

Os valores da incerteza de medição do sistema proposto utilizando geometria analítica é apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Incertezas de medição para o método vetorial.

Ângulos menores que 1°		Ângulos menores que 2°		Todo o range de medição	
rx	ry	rx	ry	rx	ry
0,060°	0,046°	0,157°	0,180°	1,032°	0,926°

3.3 Análise dos resultados

Ambos os sistemas de medição não atendem os requisitos de exatidão e range do sistema de medição de perpendicularidade. Porém, no que se refere ao range, o campo máximo de medição é de $\pm 2^\circ$, a partir deste valor foi verificada a saturação dos sensores, apesar das considerações de projeto indicarem um range de $\pm 5^\circ$.

Inicialmente os resultados de medição não puderam ser obtidos, pois a interação dos sensores proposta na Figura 6 fazia com que os valores de ângulos pequenos não fossem cobertos pelos sensores. Os gráficos apresentados, com range de medição angular reduzidos são resultantes da diminuição do range linear, originalmente de 3mm.

A solução para utilização deste sistema com range reduzido de 2°, é intercalar a medição com a movimentação do robô, num processo iterativo, até que o desvio angular seja menor que $\pm 2^\circ$. Isto acrescenta tempo ao processo, mas é uma solução viável uma vez que os erros maiores do que 2° são relativamente escassos.

No que se refere à exatidão, para um range limitado de 2°, o método por geometria analítica atendeu os requisitos do sistema, enquanto que o método por trigonometria apresentou resultados insatisfatórios.

4 Conclusão

Este artigo apresenta a verificação metrológica de um sistema proposto para medição da perpendicularidade. Este sistema deve ser utilizado em um efetuador robótico de furação e inserção de rebites em junções de fuselagem aeronáutica.

O projeto de efetadores robóticos para automação dos processos de montagem aeronáutica é um desafio que vem sendo objeto de pesquisa e investimento há alguns anos por parte dos principais fabricantes de aeronaves. O principal problema relativo ao uso de robôs industriais é a baixa exatidão de posicionamento e orientação, que não atendem aos requisitos dos processos aeronáuticos.

Neste sentido, este artigo contribui para o desenvolvimento de uma solução nacional de automação para indústria aeronáutica brasileira.

A verificação metrológica apresentada permite concluir que o sistema de medição de perpendicularidade projetado atende parcialmente os requisitos de projeto. Para tornar viável sua utilização é necessário a implementação de uma solução interativa que permita aumentar o range de medição do sistema. Apesar de aumentar os tempos de processo, esta solução é considerada viável uma vez que deve ser utilizada em um número reduzido de casos.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, à FINEP, à CAPES e à FAPESP pelo suporte financeiro para a execução deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, Raquel Melo de; FURTADO, Luís Fernando Ferreira; SUTÉRIO, Ricardo; TRABASSO, Luís Gonzaga. Análise de viabilidade para medição e montagem de estruturas de grandes volumes com o sistema GPS-Indoor. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 5., 2008, Salvador, Brasil.
- CIBIEL, Claude; PRAT, Philippe. Automation for the Assembly of the Bottom Wing Panels on Stringers for the A320. In: SAE WORLD CONGRESS, 2006, Detroit, USA. 2006-01-3143.
- DEVLIEG, Russell; SITTON, Kevin; FEIKERT, Edward; INMAN, John. ONCE (ONe-sided Cell End effector) Robotic Drilling System. In: SAE WORLD CONGRESS, 2002, Detroit, USA. 2002-01-2626.
- DEVLIEG, Russell; FEIKERT, Edward. One-Up Assembly with Robots. In: SAE WORLD CONGRESS, 2008, Detroit, USA. 2008-01-2297.
- FURTADO, Luís Fernando Ferreira; VILLANI, Emilia; SUTÉRIO, Ricardo. A PERPENDICULARITY MEASUREMENT SYSTEM FOR INDUSTRIAL ROBOTS. In: 20TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 2009, Gramado, Brasil.
- HOLLAND, Steven W.; NOF, Shimon Y.. Handbook of industrial robotics: Emerging Trends and Industry Needs. 2. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999. 1378 p. (ISBN 0-471-17783-0).
- HUTCHINSON, Seth; HAGER, Gregory D.; CORKE, Peter I. A Tutorial on Visual Servo Control. IEEE Transactions On Robotics And Automation, v. 12, p.651-670, 5 out. 1996.
- KIHLMAN, Henrik; LOSER, Raimund. 6DOF Metrology-integrated Robot Control. In: SAE WORLD CONGRESS, 2003, Detroit, USA. 2003-01-2961.
- KIHLMAN, Henrik. Affordable Automation for Airframe Assembly: Development of Key Enabling Technologies. 2005. 286 f. Thesis (Phd) - Department Of Mechanical Engineering, Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, 2005.
- MENG, Yan; ZHUANG, Hanqi. Autonomous robot calibration using vision technology: Pergamon Press. Science Direct, New York, v. 23, n. 4, p.436-446, ago. 2007.
- METRIS (Org.). Data Sheet K-Series K610-CMM. Versão 5.0, Bélgica, 2005.
- SUMMERS, Mark. Robot Capability Test and Development of Industrial Robot Positioning System for the Aerospace Industry. In: SAE WORLD CONGRESS, 2005, Detroit, USA. 2005-01-3336.