



## **AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO NA POSIÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS UTILIZADOS PARA SOLDAGEM EM TRAJETÓRIAS RETILÍNEAS ATRAVÉS DE PROGRAMAÇÃO OFF-LINE**

**Milton Luiz Siqueira**

**Antonio Piratelli Filho**

**José Maurício S. T. Motta**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Graco – Grupo de Aut. e Controle de Proc. de Fabr., [milton@unb.br](mailto:milton@unb.br), [pirateli@unb.br](mailto:pirateli@unb.br), [jmmotta@unb.br](mailto:jmmotta@unb.br).

***Resumo.** A demanda por qualidade e produtividade dos produtos industriais tem provocado um aumento significativo do número de robôs nas indústrias. Entretanto, os robôs estão sujeitos a erros que levam à redução da sua exatidão e repetibilidade. Neste trabalho, a exatidão na posição de um robô ABB IRB 2000 foi avaliada com a utilização de um relógio comparador como instrumento de medição para verificação de erros de trajetória retilínea em diversas orientações e posições no espaço de trabalho. As trajetórias investigadas simulam o percurso da tocha de soldagem em um processo de soldagem de chapas. Os erros na posição são calculados comparando-se a trajetória desejada no modelo nominal do robô com a trajetória obtida experimentalmente. Em trabalho futuro os erros na posição serão avaliados em planos e o modelo cinemático do robô será calibrado para utilização com programação off-line de precisão.*

***Palavras-Chave:** Calibração de Robôs, Avaliação de Desempenho de Robôs, Soldagem com Robôs, Erros na Posição de Robôs.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Devido à grande evolução tecnológica e à luta pela sobrevivência num mercado cada vez mais competitivo nota-se hoje em dia uma corrida em busca de produtividade e qualidade no meio industrial, sempre objetivando melhores produtos e menores custos. A automação flexível e reprogramável das linhas de fabricação tornam-se, desta forma, o principal meio para alcançar tais metas.

A crescente busca de qualidade e produtividade dos produtos industriais tem provocado um aumento significativo do número de robôs nas indústrias. Entretanto, os robôs industriais com vários graus de liberdade (seis ou mais) e amplo espaço de trabalho apresentam erros geométricos associados ao desalinhamento de juntas, às posições iniciais dos “encoders” e aos comprimentos dos elos, resultantes principalmente de variações durante o processo de fabricação, do desgaste em

operação e de desmontagem para manutenção (Roth et al., 1987). De acordo com Bernhardt (1997) e Schröer (1993), os erros geométricos representam aproximadamente 90% dos erros totais na posição de robôs. Estes erros levam a uma significativa redução da exatidão na posição do robô, o que faz com que sua utilização através de programação “off-line”, em tarefas que exijam elevada precisão, seja limitada. De acordo com a literatura, erros na posição têm sido relatados como sendo de até 10mm em robôs de uso industrial, medidos em um amplo volume do espaço de trabalho, mesmo quando novos (Stark et al, 1993).

O presente trabalho é parte de um estudo sobre os efeitos da calibração de robôs na precisão de processos de soldagem utilizando programação “off-line”. Nesta primeira parte, a exatidão na posição de um robô ABB IRB 2000 foi avaliada com a utilização de um relógio comparador como instrumento de medição para verificação de erros de trajetória retilínea em diversas orientações e posições no espaço de trabalho. As trajetórias investigadas simulam o percurso da tocha de soldagem em um processo de soldagem de chapas. Os erros na posição são calculados através de um modelo cinemático idêntico ao modelo nominal do robô, em que se inclui o sistema externo de coordenadas, e a programação do robô é feita utilizando este sistema. Os erros de trajetória medidos são comparados com as posições das trajetórias fornecidas pelo modelo e a exatidão na posição deve ser calculada nas três direções ortogonais do espaço cartesiano.

## **2. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE ROBÔS INDUSTRIAIS**

Assim como os erros, as suas fontes, os tipos e os métodos de avaliação, as características de desempenho também exigem o entendimento claro dos conceitos envolvidos nos parâmetros avaliados. A norma BS 7228 (1991) define a terminologia e especifica algumas condições que devem ser ensaiadas em robôs industriais. Algumas características são a exatidão, repetibilidade, sensibilidade, estabilidade e busca.

Depois de estabelecer as características de desempenho, um item de fundamental importância na avaliação dos robôs industriais é o método utilizado. Este item é de grande importância pela necessidade da verificação clara dos parâmetros que representam o comportamento real do robô. A comparação do desempenho real do robô, com relação às características especificadas pelos fabricantes, torna-se também um fato de extrema importância em função do alto custo do equipamento (Abackerli, 1992).

No estudo dos métodos de avaliação de robôs industriais, é importante estabelecer as diferenças entre calibração e avaliação de desempenho. Na primeira, os parâmetros são determinados, em geral, sem a presença de carga enquanto na segunda, estes são determinados, em geral, com o robô submetido a solicitações externas. Além disso, a calibração exige um modelamento matemático específico, onde se inclui o maior número possível de fontes de erros geométricos e/ou dinâmicos, e tem por objetivo determinar o modelo cinemático e dinâmico do robô real (físico), e por isso, é função do modelo do controlador e da estrutura física (topologia) do robô (Mc Kerrow, 1991).

A avaliação de desempenho é usada para verificações periódicas do estado geral do robô, e pode ser feita de duas maneiras: através da medição interna das variáveis de juntas do robô e através da medição externa da posição espacial do elemento terminal. A medição interna consiste na determinação dos parâmetros do robô através da leitura das escalas angulares internas, e a medição externa consiste na determinação dos parâmetros do robô empregando instrumentos externos para localizar o elemento terminal no espaço de trabalho.

Dentre as razões que justificam a execução da avaliação de desempenho pela medição externa da posição do elemento terminal, pode-se citar: a possibilidade de se definirem procedimentos padrões de testes independentes do tipo de estrutura dos mesmos; a possibilidade de gerar padrões de comparação entre robôs, através de parâmetros diretamente relacionados ao uso; pode-se ainda avaliar parâmetros de projeto que não entram nas malhas de controle.

### **3. CALIBRAÇÃO DE ROBÔS**

A calibração de robôs é um processo integrado de modelagem, medição, identificação numérica de características físicas reais do robô, e implementação de um novo modelo. O procedimento de calibração primeiramente envolve o desenvolvimento de um modelo cinemático cujos parâmetros representem precisamente o robô real. Em seguida, características geométricas especificamente selecionadas são medidas utilizando-se de instrumentos de medição com precisão conhecida. Então um procedimento de identificação de parâmetros é realizado para computar o grupo de parâmetros que, quando introduzidos no modelo nominal do robô, representem precisamente o comportamento do robô. Finalmente, o modelo é corrigido no sistema de controle de posição (Motta & McMaster, 1999).

Após o procedimento de calibração do modelo cinemático de um robô, em qualquer aplicação em que seja necessária ou se deseje utilizar programação off-line, é preciso realizar um procedimento para transformar coordenadas de posição entre o sistema da base do robô e o sistema externo de coordenadas no espaço de trabalho. Uma das maneiras de se realizar essa etapa é obter alguns pontos do espaço de trabalho, dos quais se conheçam as coordenadas no sistema externo, e ao mesmo tempo obter as coordenadas fornecidas pelo sistema de controle do robô quando seu elemento terminal estiver posicionado sobre esses pontos (Motta, 1999). Pode-se, então, fazer a transformação entre os dois sistemas de maneira a minimizar os erros da geometria do movimento nos dois sistemas. Com isso, pode-se relacionar qualquer ponto representado no sistema externo com o necessário comando para mover o robô até o ponto nas coordenadas da base do robô.

Neste trabalho, essa transformação de coordenadas é feita para cada ensaio de trajetória, com o objetivo apenas de se quantificarem os erros existentes no modelo nominal. Em trabalho futuro, a transformação de coordenadas entre o sistema externo e o da base do robô será feita para um espaço de trabalho em planos e volumes, e depois comparados com os erros obtidos após a calibração do modelo nominal.

### **4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Os instrumentos utilizados foram um robô ABB IRB 2000, um suporte para relógio comparador, uma régua de granito (padrão) marca RAHN e com repetibilidade 0,00127 mm, um relógio comparador centesimal MITUTOYO com repetibilidade 0,005 mm e curso 30 mm, e um nível de precisão, marca C. STIEFELMAYER KG, com resolução 0,05 mm/m.

As condições de operação, no local onde o robô se encontra instalado, foram monitoradas, e a temperatura ambiente foi registrada; o robô foi operado manualmente *on-line*, apresentando uma velocidade de 30 mm/s e percorrendo trajetórias retilíneas com curso de 800 mm.

O experimento utilizado para executar este trabalho segue a seguinte rotina: primeiro, o suporte para o relógio comparador deve ser instalado no robô; a seguir, a régua de granito (padrão de retilineidade) deve ser posicionada no local a ser medido, tendo o cuidado de buscar o nivelamento

adequado em relação ao solo (não é condição necessária, mas desejável), utilizando um nível de precisão.

Após definir o espaço de trabalho a ser investigado, os movimentos do robô devem ser programados e em seguida carregados na memória do controlador. O programa executa o movimento ao longo de uma linha reta, na direção desejada, executando as leituras com o relógio comparador durante a movimentação nos dois sentidos de deslocamento linear (ida e volta). Os deslocamentos devem ser repetidos para fazer cinco (05) leituras em cada sentido.

O espaço de trabalho do robô deve ser verificado utilizando o comando manual. São feitos ensaios para determinar os erros de retineidade em diferentes trajetórias que descrevem um paralelepípedo e outras trajetórias intermediárias dentro desse espaço. Com isso consegue-se a avaliação em vários planos distintos, pois são atingidos planos de altura mínima, intermediária e máxima, e como se trabalha com posições extremas e intermediárias, diversas configurações do braço do robô também são alcançadas (contraído, estendido, etc.).

Com este propósito foi construído um suporte para a régua padrão de granito que permite a variação da altura e orientação da trajetória a ser medida. Deste modo avalia-se a performance do robô em parte do espaço de trabalho, principalmente o espaço destro, ou seja, o espaço onde o robô pode alcançar qualquer posição com todas as possíveis orientações.

Uma recomendação que deve ser seguida é a realização de medições sem carregamento no manipulador, usando 50% da carga nominal e também a carga máxima permitida. Por medidas de segurança, o procedimento proposto sugere usar apenas as configurações sem carga e 50% da carga máxima, que no caso em questão, corresponde a uma massa de 5 kg fixada na extremidade do manipulador robótico.

Os erros investigados são os de retineidade da trajetória. Para isto, o manipulador do robô deve ser movimentado ao longo de uma trajetória retilínea no plano 'xy' (paralelo ao piso), e são medidas as variações na altura do deslocamento no plano 'xz' (perpendicular ao piso), e as variações que acontecem no plano 'xy' perpendicular ao deslocamento. Movendo o robô no eixo 'z' do plano 'zx' os erros no plano 'zx' (perpendicular ao piso) são determinados.

Para facilitar o mapeamento das medições, o espaço de trabalho do robô é delimitado na forma de um cubo, cujas arestas são numeradas e estes números servem de rótulo às trajetórias efetuadas. De acordo com a Figura 1, o espaço representado em linha contínua é o espaço real de movimentação do robô, enquanto que o espaço mostrado em traço pontilhado é o espaço utilizado nos ensaios relativos à avaliação de desempenho. O posicionamento do robô é aqui representado na figura 1 pelo desenho do robô. A figura 2 apresenta um esquema com a identificação das trajetórias utilizadas nos ensaios. À cada trajetória retilínea descrita pelo robô assinala-se uma linha, e à cada linha um número.

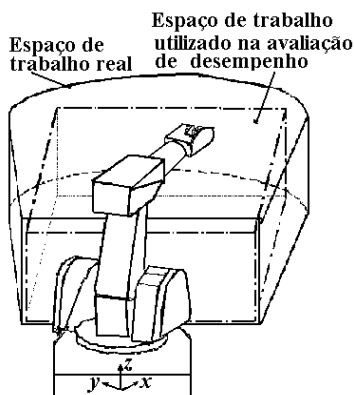


Figura 1 - Representação esquemática do espaço de trabalho do robô

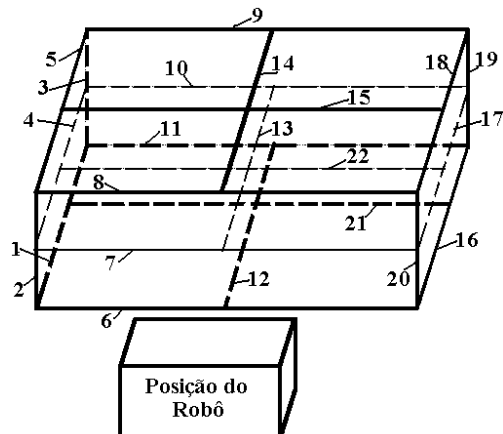


Figura 2 - Esquema de distribuição das trajetórias executadas pelo robô

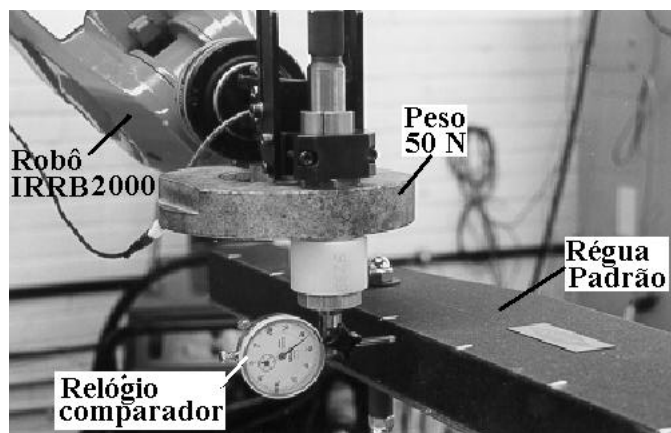


Figura 3 - Montagem do relógio comparador com carga de 5 Kg.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na programação do robô, o manipulador foi forçado a descrever uma trajetória retilínea na direção dos eixos X, Y ou Z do próprio robô. Para isto, foi utilizado um método de aproximação de uma reta traçada a partir de um ponto inicial “Zero”, ao último ponto medido. O último ponto fornece a altura de inclinação da reta que será usada como referência. Neste processo admite-se que os pontos extremos descrevem uma reta paralela ao eixo de coordenadas do robô, e em relação a ela medem-se os erros de retilineidade durante o deslocamento (o zero é ajustado no início de cada medição).

Assim, considerando como referência a reta que liga o primeiro e o último ponto, os erros de retilineidade consistem nos desvios em relação a esta reta. Estes erros foram determinados cinco vezes em cada sentido de medição, e a partir destes dados fez-se um tratamento estatístico utilizando a média e o desvio padrão (s) em cada trajetória, para apresentação dos resultados na

forma de gráficos. No gráfico, a dispersão em cada trajetória (ida e volta) foi tomada como sendo dois desvios padrões, admitindo uma distribuição normal de probabilidades e uma confiança de 95%.

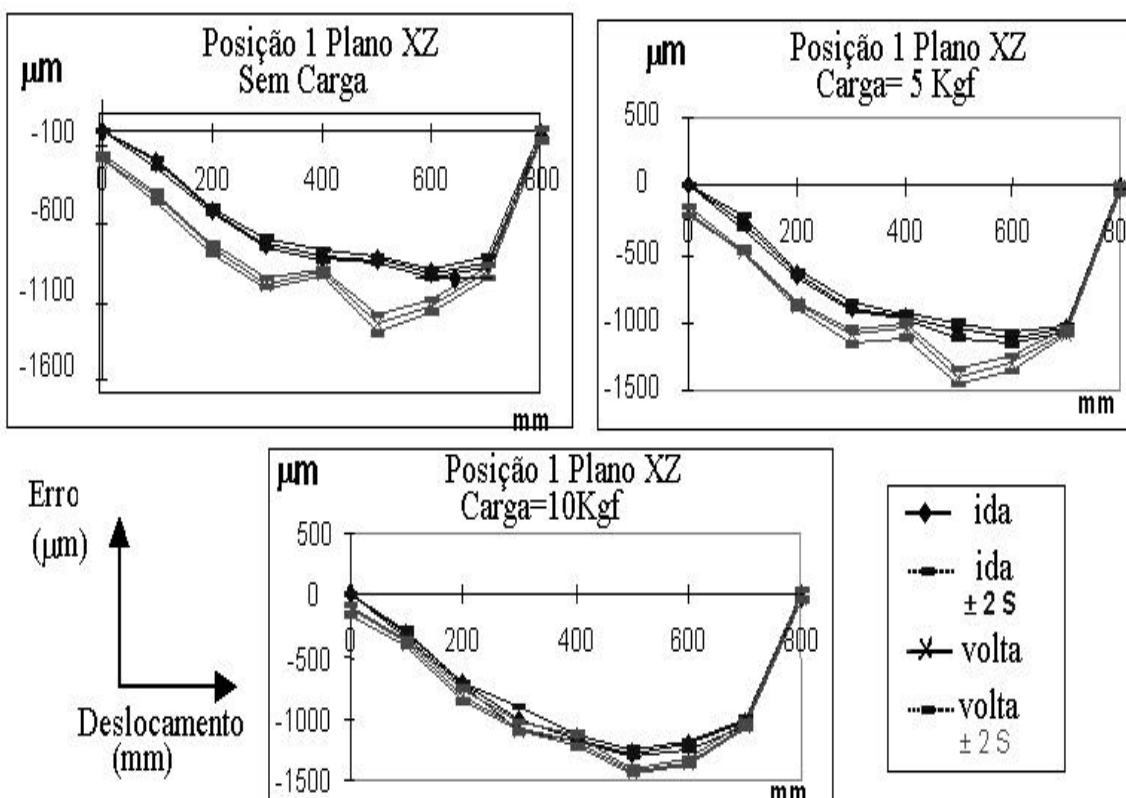
É interessante ressaltar que existe uma variação na altura de 0,02 mm decorrente da operação de liga/desliga dos atuadores do robô. Esta variação não foi considerada, uma vez que os ensaios foram realizados com os motores do robô acionados. As variáveis envolvidas em cada trajetória avaliada foram carga e altura do deslocamento. Os erros quantificados foram retlineidade da trajetória, dispersão e histerese entre os caminhos de ida e volta.

Pode-se fazer a análise dos resultados observando-se os planos avaliados. Dessa maneira tem-se os planos XZ, YZ, XY, YX, ZX. A primeira letra designa o eixo seguido no deslocamento, enquanto que a segunda designa o eixo no qual é medida a variação. Por exemplo, em XZ tem-se um deslocamento da ferramenta na direção do eixo 'X', e a variação é medida na direção do eixo 'Z'.

Da análise dos resultados obtidos, notam-se alguns comportamentos gerais, comentados nos parágrafos a seguir.

Os erros de retlineidade determinados no eixo 'Z' apresentaram sempre a mesma tendência, apresentando uma variação no sentido negativo do eixo, ou no sentido da força de gravidade. Os erros de retlineidade medidos no eixo 'Y' também apresentaram uma direção preferencial. Ela se manifesta no sentido positivo do eixo, para a direita, supondo o observador parado de frente para o robô. No eixo 'X', as medições indicaram que a variação dos erros de retlineidade pode ser positiva ou negativa em relação ao eixo. Isto varia basicamente com a configuração do braço imposta pela altura de trabalho. Nas menores alturas, nas bordas do espaço de trabalho, foi encontrada uma variação dos erros no sentido de saída do espaço. Alternando-se para alturas maiores, as variações invertem o sentido e tendem para o centro do espaço de trabalho.

A variação do carregamento provocou alterações no comportamento dos erros. O aumento da carga para 50% da capacidade nominal resultou num aumento dos valores da retlineidade, da



histerese (variação na trajetória entre ida e volta) e do erro aleatório (variação na posição entre medições). Porém o mesmo não aconteceu com as observações feitas para carga máxima, onde foi observado que a histerese e o erro de reticidade diminuem, enquanto que o erro aleatório se mantém aproximadamente constante. A figura 4 apresenta este comportamento. Foi ainda observado que a configuração do braço totalmente estendido resultou numa grande vibração do manipulador, principalmente sem aplicação de carga.

Figura 4 - Comportamento dos erros de reticidade com o aumento de Carga

A variação da altura ou da posição vertical (eixo Z) das linhas retas adotadas também provocou mudanças no comportamento dos erros de reticidade, sendo que as menores alturas propiciaram as condições menos favoráveis de operação.

O procedimento adotado no experimento permitiu estimar a inclinação dos eixos de coordenadas em relação à mesa de trabalho. Após fazer o nivelamento da régua de granito com a utilização de um nível de precisão de ar, os valores dos erros de reticidade do primeiro (zero) e do último ponto são medidos e a partir deles determina-se a reta de referência que, em tese, é uma reta paralela ao eixo da coordenada do robô. As estimativas dos erros de reticidade obtidas estão relacionadas a essa reta “ideal”, chamada de reta de referência. Estes erros estimados são intrínsecos ao robô, independentes de localização, enquanto que os erros de alinhamento de montagem vão mudar quando a instalação física do robô for alterada. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os erros resultantes da inclinação entre os eixos de coordenadas do robô e a reta de referência.

Tabela 1 - Inclinação da reta de referência do robô

Posição	Plano de medição	Direção de movimento	Carga no manipulador (kgf)	Erro (mm)
1	XZ	X	0	277
1	XZ	X	5	342
1	XZ	X	10	199
12	XZ	X	0	438
12	XZ	X	5	484
17	XZ	X	0	261
17	XZ	X	5	265
10	YZ	Y	0	370
10	YZ	Y	5	394

No que se refere à magnitude dos erros de reticidade, podemos dizer que eles acontecem nas menores alturas Z, com cargas maiores, e que de um modo geral quando se sai de uma situação em que se objetiva melhorar a histerese, perde-se em dispersão e vice-versa.

## 6 CONCLUSÃO

Os erros calculados, proporcionados pela inclinação entre a reta de referência e os eixos de coordenadas, foram inferiores a 0,5 mm em todos os casos analisados. Para aplicações em soldagem com traçados retilíneos, esses valores se mostram satisfatórios. Entretanto, é importante frisar que a base do robô foi ajustada (reta ajustada aos pontos medidos utilizando o método dos mínimos quadrados) para cada uma das trajetórias. Esse procedimento dificilmente será aplicado quando o traçado da tocha de soldagem tiver várias direções em um mesmo plano, o que certamente poderia aumentar em várias vezes os valores dos erros obtidos.

Uma análise comparativa dos erros encontrados nas diferentes trajetórias permitiu fazer observações a respeito das melhores e piores regiões do espaço de trabalho. Com relação aos erros de retilinearidade, foi observado que na trajetória correspondente à posição 7 (plano YX, sem carga) os seus valores foram de menor magnitude, enquanto que na posição 12 (plano XZ, com carga de 5 kg) foram de maior magnitude. Com relação à dispersão, os erros de maior magnitude ocorreram na posição 11 (plano YZ, carga de 5 Kg), e os de menor magnitude na posição 16 (plano XY, sem carga). No que se refere à histerese, os erros de maior magnitude foram encontrados na posição 4 (plano XZ, com carga de 5 Kg), e os de menor magnitude na posição 11 (plano YX, com carga de 5 Kg).

## REFERÊNCIAS

- Abackerli, A. J., 1992. Sistema de Rastreamento Interferométrico para Calibração Volumétrica de Robôs Industriais, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, EESC, São Carlos.
- Bernhardt, R., 1997, "Approaches for commissioning time reduction", *Industrial Robot*, Vol. 24, No. 1, pp. 62-71.
- BS 7228, 1991. Section 4.1: ISO 9283, Manipulating industrial robots - Performance and related testing methods.
- Mc Kerrow, J. P., 1991. *Introduction to Robotics*, Sydney, Addison-Wesley.
- Motta, J. M., 1999. Optimised Robot Calibration Using a Vision-Based Measurement System With a Single Camera, Relatório de Tese de Doutorado, Cranfield University, Reino Unido.
- Motta, J.M. & McMaster, R.S., 1999, Modeling, Optimizing and Simulating Robot Calibration with Accuracy Improvement, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 3, Sep. 1999, pp. 386-402.
- Roth, Z.S., Mooring, B.W. & Ravani, B., 1987. "An Overview of Robot Calibration", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3, N.o 3, pp. 377-85.
- Schröer, K., 1993. Theory of kinematic modeling and numerical procedures for robot calibration, *Robot Calibration*, edited by R. Bernhardt and S. L. Albright, Chapman & Hall, London.
- Stark, G, Benz, E. & Huttenhofer, M. , 1993. Calibration Experiences in Industry. *Robot Calibration*, edited by R. Bernhardt and S. L. Albright, Chapman & Hall, London, 283-295.

## POSITION ACCURACY EVALUATION OF INDUSTRIAL ROBOTS USED IN STRAIGHT WELDING UNDER OFF-LINE PROGRAMMING

*Abstract. The demand for quality and productivity of industrial products have increased significantly the use of robots in industry. Nevertheless, robots are subject to errors which reduce their accuracy and repeatability. In this work, the position accuracy of a ABB IRB*



*2000 robot was evaluated using a dial gage for measuring errors from a straight trajectory at various positions and orientations in the workspace. The trajectories were chosen to simulate the path of a welding gun in a plate welding process. The position errors are calculated comparing the desired trajectory in the robot nominal model with the trajectory obtained experimentally. In a future work the position errors will be evaluated in planes and the robot kinematic model will be calibrated to be used with accurate off-line programming.*

**Keywords:** *Robot Calibration, Robot Welding, Robot Position Errors.*