

CALIBRAÇÃO DE GIRÔMETROS UTILIZANDO UM MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL

ADRIANO A. A. MOURÃO*, GUILHERME A. S. PEREIRA*

**Laboratório de Sistemas de Computação e Robótica – CORO
Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos – PDVA
Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: adrianodasho@ufmg.br, gpereira@ufmg.br

Abstract— This paper presents a novel methodology to calibrate gyrometers using a robotic manipulator. The proposed methodology is related to a larger project that aims to calibrate all sensors of Inertial Measurement Units (IMUs) using more accessible equipments. In this context, the results presented in this paper are complementary to those presented in the literature where industrial robots are used to calibrate accelerometers and magnetometers. In this paper, the proposed methodology is validated using a commercial IMU and a anthropomorphic, 6 degrees of freedom industrial manipulator.

Keywords— Industrial robot manipulators, instrumentation, gyrometer, inercial measurement unity, sensor calibration

Resumo— Este artigo apresenta um novo método de calibração de girômetros com o uso de um manipulador industrial. A metodologia apresentada se insere em um projeto mais amplo cujo objetivo é a calibração dos sensores de Unidades de Medição Inercial (IMUs) utilizando equipamentos mais acessíveis a empresas e universidades. Neste contexto, os resultados do artigo são complementares àqueles já apresentados na literatura, onde robôs industriais são utilizados para calibrar acelerômetros e magnetômetros. Neste artigo, a metodologia proposta é validada com a utilização de uma IMU comercial e um manipulador industrial antropomórfico de seis graus de liberdade.

Palavras-chave— Manipuladores Robóticos Industriais, Instrumentação, Girômetro, Unidades de Medição Inercial, Calibração de sensores

1 Introdução

Este artigo está inserido em um contexto de um projeto mais amplo que visa o desenvolvimento de Unidades de Medição Inercial (IMU, *Inercial Measurement Unity*) para veículos aéreos não tripulados (UAVs, *Unmanned aerial vehicle*). Uma parte importante na pesquisa e desenvolvimento destes veículos está na medição das grandezas físicas relacionadas à sua posição e orientação. Dessa forma, uma IMU é um sistema composto basicamente por acelerômetros, girômetros e magnetômetros, sensores cujos dados são combinados para fornecer os ângulos de atitude do veículo. Visando a redução de seu custo, geralmente estes sensores, usualmente fabricados com tecnologia MEMS (*Microelectromechanical Systems*) (Barbour and Schmidt, 2001), são fornecidos sem uma folha de calibração, o que torna a determinação da curva entre a tensão de saída do sensor e o valor da grandeza a ser medida uma etapa fundamental para o projeto de IMUs (Aslan and Saranlı, 2008; Skog and Händel, 2006). Assim, este artigo apresenta mais um passo do Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos da UFMG (PDVA) em relação ao objetivo de se propor técnicas de calibração para os sensores de uma IMU utilizando sistemas mais acessíveis do que aqueles disponíveis comercialmente e especialmente desenvolvidos para esta função (Lee et al., 2011).

Na busca pela redução de custos no processo

de calibração de IMUs, alguns trabalhos foram propostos na literatura. Hall and Williams (2000) projetaram e implementaram um manipulador paralelo para calibração de IMUs usando múltiplas antenas de GPS de alta precisão. Basicamente, a unidade a ser calibrada e as antenas de GPS são afixadas a um manipulador paralelo de 4 graus de liberdade. O manipulador é atuado de forma a girar os sensores em torno dos três eixos coordenados. A principal vantagem do sistema em relação a outras alternativas comerciais é que o manipulador não precisa prover grande precisão de posicionamento, uma vez que esta é garantida pelo sistema de GPS. Shin and El-Sheimy (2002) propuseram uma metodologia onde a IMU é posicionada em diversas configurações pré-definidas e a aceleração da gravidade e a velocidade de rotação da terra são usadas como entrada de excitação para acelerômetros e girômetros, respectivamente. Como a velocidade de rotação da terra é muito pequena, diversos problemas de observabilidade apareciam no processo de calibração dos girômetros. Estes problemas foram resolvidos por Syed et al. (2007) com a introdução de um mecanismo de rotação para a IMU. O trabalho também considerou a estimação do desalinhamento espacial entre os sensores, muito importante para algoritmos de fusão sensorial. Renk et al. (2005) utilizaram um manipulador antropomórfico para calibrar acelerômetros e magnetômetros. Os autores também utilizaram grandezas naturais como

a aceleração da gravidade e o campo magnético da terra como variáveis de excitação dos sensores. Neste caso, o robô é usado somente para mudar a orientação dos sensores em relação a estas grandezas. Como em (Syed et al., 2007) os autores consideram a estimação do desalinhamento espacial entre os sensores.

O trabalho descrito no presente artigo pretende ser um complemento daquele apresentado em (Silva et al., 2011), que por sua vez é uma implementação da metodologia para calibração de acelerômetros proposta em (Renk et al., 2005). Esta metodologia é baseada no fato de que o robô é uma referência confiável de posição no espaço. Então, a partir de uma trajetória muito lenta efetuada pelo manipulador, na qual podemos considerar que a gravidade é a única aceleração presente, tenta-se encontrar os parâmetros de calibração a partir da formulação de um problema de otimização. Neste artigo, de forma complementar, pretende-se calibrar um outro sensor fundamental, o girômetro. Serão utilizados alguns conceitos desenvolvidos nos trabalhos anteriores para a formulação da solução, mas a principal diferença neste caso é o fato de que o manipulador, além de posicionar espacialmente o sensor, é também a fonte de movimento responsável por sua excitação. O resultado apresentado neste artigo é mais um passo rumo ao objetivo principal do projeto de calibração de uma *IMU* com o uso de manipuladores robóticos.

O artigo está dividido como se segue. A próxima seção apresenta a modelagem matemática do problema de calibração de girômetros utilizando um manipulador robótico e discute como os parâmetros do modelo de calibração proposto podem ser encontrados. A Seção 3 descreve o aparato experimental e os experimentos realizados para validar a metodologia proposta, bem como a análise e discussão dos resultados obtidos. Finalmente, a Seção 4 apresenta uma análise conclusiva do método proposto e discute direções para trabalhos futuros.

2 Metodologia

2.1 Modelagem Matemática

A metodologia apresentada neste artigo baseia-se no fato de que a velocidade angular das juntas de um manipulador, que geralmente são facilmente medidas por meio de encoders ou resolvers, se relacionam com as velocidades lineares e angulares de seu efetuador (*end effector*) por meio da seguinte equação (Spong et al., 2006):

$${}^E\nu = {}^E J(\Theta)\dot{\Theta}, \quad (1)$$

onde Θ é o vetor das posições angulares das juntas do manipulador, $\dot{\Theta}$ é sua derivada temporal, que

representa a velocidade das juntas do manipulador, ${}^E J(\Theta)$ é a matriz Jacobiana do manipulador e ${}^E\nu$ é o vetor de velocidades no espaço cartesiano dado por:

$${}^E\nu = \begin{bmatrix} {}^E v \\ {}^E \omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

sendo ${}^E v$ o vetor velocidade linear e ${}^E \omega$ o vetor velocidade angular. O superescrito E nas equações acima indica que as grandezas são representadas no referencial $\{E\}$, fixo ao efetuador do manipulador e descrito pelos vetores unitários e ortogonais \hat{i}_E , \hat{j}_E e \hat{k}_E . Assim, o vetor velocidade linear ${}^E v$ é composto pelas componentes de velocidade linear nas direções de \hat{i}_E , \hat{j}_E e \hat{k}_E , enquanto que o vetor velocidade angular ${}^E \omega$ é composto pelas componentes de velocidade angular em torno destes vetores.

Tendo em vista a forma de ${}^E\nu$ e os objetivos deste artigo, torna-se conveniente escrever a matriz Jacobiana do manipulador como:

$${}^E J(\Theta) = \begin{bmatrix} {}^E J_v(\Theta) \\ {}^E J_\omega(\Theta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

de forma que o vetor velocidade angular do efetuador relacione-se diretamente com as velocidades das juntas por meio da seguinte equação:

$${}^E \omega = {}^E J_\omega(\Theta)\dot{\Theta}. \quad (4)$$

Girômetros são sensores capazes de medir uma componente escalar de velocidade angular em torno de seu eixo principal. Considera-se neste artigo que três girômetros são rigidamente afixados ao efetuador do robô manipulador. Desta forma, torna-se possível relacionar as velocidades angulares medidas pelos girômetros e as velocidades angulares do efetuador do robô.

Para tanto, considere que o eixo principal do girômetro k ($k = 1, 2$ ou 3) pode ser representado por um vetor ${}^E P_k$ expresso no referencial do efetuador do robô. Este vetor, pode ser obtido por meio de rotações do vetor unitário \hat{i}_E , como mostrado na Figura 1. Assim, para se determinar o vetor ${}^E P_k$ deve-se girar \hat{i}_E de um ângulo ϕ_k em torno do eixo \hat{j}_E , seguida de uma rotação de ψ_k em torno do eixo \hat{k}_E , conforme pode ser visualizado na Figura 1. Matematicamente tem-se o vetor unitário resultante:

$${}^E P_k(\phi_k, \psi_k) = R_{\hat{k}}(\psi_k)R_{\hat{j}}(\phi_k)\hat{i}_E, \quad (5)$$

sendo que

$$R_{\hat{j}}(\phi_k) = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & 0 & \sin \phi_k \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_k & 0 & \cos \phi_k \end{bmatrix}$$

e

$$R_{\hat{k}}(\psi_k) = \begin{bmatrix} \cos \psi_k & -\sin \psi_k & 0 \\ \sin \psi_k & \cos \psi_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

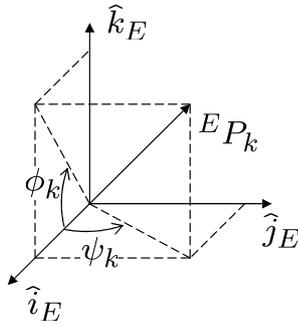


Figura 1: Rotações que definem a orientação do girômetro em relação a garra.

Uma vez definido o eixo dos girômetros, a velocidade angular percebida pelo girômetro k é dada como a projeção do vetor velocidade angular do efetuador, ${}^E\omega$, sobre a direção de ${}^E P_k$:

$$\omega_k = {}^E\omega \cdot {}^E P_k = {}^E P_k^T {}^E\omega. \quad (6)$$

Finalmente, assumindo que o sinal elétrico fornecido pelo girômetro k em volts é dado por:

$$V_k = S_k \omega_k + \delta_k, \quad (7)$$

onde S_k é a sensibilidade do sensor e δ_k é a polarização, pode-se, com o auxílio das equações (4), (5) e (6) escrever este sinal em função da velocidade das juntas do manipulador como:

$$V_k = S_k \left[R_{\hat{k}}(\psi_k) R_{\hat{j}}(\phi_k) \hat{i}_E \right]^T {}^E J_\omega(\Theta) \dot{\Theta} + \delta_k. \quad (8)$$

Assim, observa-se que V_k pode ser escrita como uma função dos parâmetros $S_k, \delta_k, \phi_k, \psi_k$ e das variáveis Θ e $\dot{\Theta}$:

$$V_k \equiv V_k(S_k, \delta_k, \phi_k, \psi_k, \Theta, \dot{\Theta}). \quad (9)$$

A curva de calibração de cada girômetro, assumindo linearidade do sensor, pode ser determinada por S_k e δ_k , que são, aparentemente, os parâmetros mais importantes a serem identificados. No entanto, é patente a importância na determinação de ϕ_k e ψ_k que, em sistemas contendo três girômetros, poderão indicar o desalinhamento espacial entre estes dispositivos. Em geral, sistemas inerciais assumem que os girômetros são montados com eixos perpendiculares entre si, mas falhas no processo de montagem do dispositivo ou até mesmo na fabricação de sensores triaxiais podem causar um desalinhamento destes eixos. O conhecimento deste desalinhamento é de extrema importância para a medição completa do vetor velocidade angular.

Assim, o procedimento de calibração proposto neste artigo consiste em mover o manipulador robótico e medir, durante o movimento, os vetores de posição e velocidade angular Θ e $\dot{\Theta}$ além das tensões de saída dos três girômetros fixos à sua

garra. Com estes dados, é montado um problema de otimização não-linear a fim de se encontrar os parâmetros desconhecidos na Equação (8), como será detalhado na próxima seção.

2.2 Estimação de Parâmetros

Como mencionado anteriormente, para estimação dos parâmetros S_k, δ_k, ϕ_k e ψ_k da Equação (8), o manipulador deve se mover em uma trajetória. Esta trajetória deve ser escolhida de acordo com o dispositivo a ser calibrado, de forma que a velocidade angular da garra seja compatível com a faixa de medição (*range*) do girômetro preso a ela. Neste artigo, as juntas do manipulador foram controladas independentemente de forma a executar movimentos periódicos em toda sua amplitude. Após a coleta dos dados, utilizou-se a Equação (4) para verificar a compatibilidade das velocidades executadas com o dispositivo em calibração. Uma metodologia que construa a trajetória de forma a excitar todo o range do sensor poderia trazer ganhos ao processo de calibração e é deixada como trabalho futuro. Basicamente, esta metodologia deveria resolver o problema inverso ao da Equação (4), determinando quais seriam as velocidades das juntas que causariam as velocidades desejadas na garra.

Uma vez coletados os dados relativos ao movimento do robô e as tensões de saída dos girômetros, formula-se um problema de otimização de mínimos quadrados para cada girômetro como:

$$H_k(S_k, \delta_k, \phi_k, \psi_k) = \sum_{j=1}^n (V_{k_{out}}^j - V_k^j)^2, \quad (10)$$

onde $V_{k_{out}}^j$ é a j -ésima medição do k -ésimo girômetro e V_k^j é dado pela Equação (8).

A Equação (10) possui mínimos locais, o que pode fazer com que os métodos clássicos de otimização não convirjam. Uma maneira de resolver esse problema é utilizar, antes destes métodos, métodos evolutivos para determinação de soluções iniciais próximas ao mínimo global. Os algoritmos genéticos foram o caminho escolhido neste trabalho. Após os algoritmos genéticos o método Quasi-Newton é utilizado para refinar a solução encontrada. A próxima seção apresenta e discute os resultados experimentais encontrados com esta metodologia.

3 Resultados Experimentais

3.1 Aparato experimental

Para avaliação da metodologia apresentada na seção anterior, foi utilizado um manipulador *Smart Six* de seis graus de liberdade fabricado pela *CO-MAU Robotics*. Uma foto do manipulador robótico está na Figura 2. A programação do

robô foi realizada em *C++* utilizando a biblioteca *C4GOpen*. Esta biblioteca é fornecida como um sistema opcional ao robô e permite a interação do usuário com seu *hardware* e *software* de baixo nível. A biblioteca é desenvolvida para ambiente *LINUX* com a extensão de tempo real *RTAI* e comunica com o manipulador por uma conexão em tempo real usando as funções da biblioteca *RT-net*. A frequência desta comunicação é de 500 Hz. Optou-se por utilizar a biblioteca *C4GOpen* neste trabalho, uma vez que foi constatada certa imprecisão na medição de velocidade quando era utilizado o software industrial do robô.



Figura 2: Manipulador COMAU SmartSix em uma tarefa de calibração.

Os girômetros a serem calibrados foram aqueles de uma unidade de Medição Inercial modelo *3dmGX2 wireless* produzida pela *MicroStrain*. Esta possui três acelerômetros e três girômetros, além de uma estação sem fio que fornece os dados a uma frequência de 40 Hz via porta USB. Porém, como o protocolo de comunicação do sistema entrega apenas um conjunto de informações a cada mensagem, a frequência de amostragem caiu pela metade, 20 Hz.

3.2 Procedimento experimental

O experimento realizado consistiu na aplicação de um movimento senoidal nas juntas 1, 4, 5 e 6 com amplitudes e frequências constantes. Então, a equação da posição da junta i representada por θ_i , sendo $i = 1, 4, 5$ e 6, é definido como:

$$\theta_i = \theta_0 + A \cos(2\pi ft), \quad (11)$$

onde f a frequência, t é o tempo, A a amplitude e θ_0 a posição inicial do eixo.

Os dados gerados para o procedimento de calibração são provenientes de um experimento com $f = 0,25$ Hz para todos os eixos, $A_1 = 10^\circ$, $A_4 = 70^\circ$, $A_5 = 40^\circ$ e $A_6 = 100^\circ$. A Figura 3 mostra os gráficos da posição dos eixos 1, 4, 5 e 6

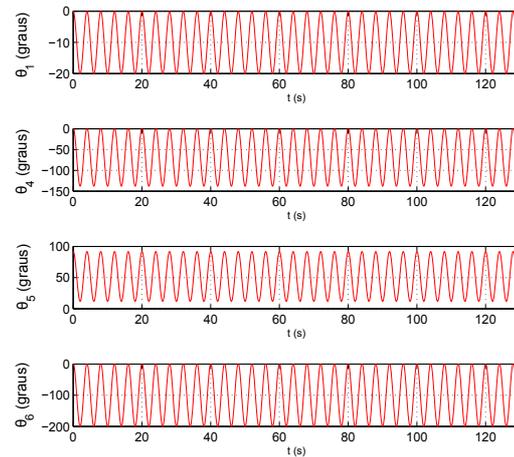


Figura 3: Posição angular dos eixos em função do tempo.

em função do tempo. Os eixos 2 e 3 permaneceram fixos nas posições $0,002^\circ$ e $-90,0^\circ$ respectivamente.

Enquanto o robô executava o movimento descrito anteriormente, uma *thread* coletava os dados dos girômetros a uma frequência de aproximadamente 20 Hz. O fato da IMU ser *wireless* causou alguns inconvenientes. Em algumas amostragens os dados enviados foram perdidos por chegarem com ruído ou por terem excedido o tempo de espera. No entanto, a quantidade de dados perdidos foi inferior a 2%, o que não interferiu significativamente no resultado final.

A sincronização dos *timers* das fontes de dados, o manipulador e a IMU, é um desafio importante nesse tipo de projeto. Qualquer desvio significativo irá gerar uma diferença de fase entre os dados. Para resolver o problema, o atraso do envio dos dados pela IMU foi desconsiderado, uma vez que se mostrou desprezível, e o valor dos dois *timers* ao receber o primeiro pacote de informações proveniente dos girômetros foi armazenado. Assim os tempos iniciais foram igualados e os valores de tempo restantes foram normalizados *offline*.

Após a sincronização dos *timers*, foi necessária a sincronização dos dados, já que eles foram recebidos em instantes de tempo diferentes. Para resolver esse problema foi usado uma das vantagens da biblioteca *C4GOpen* que é a alta frequência de amostragem de 500 Hz. Como essa frequência é muito maior do que a da IMU, 20 Hz, foi possível associar cada conjunto de dados dos girômetros com o de tempo mais próximo do robô. Dessa maneira tem-se, no pior caso, um erro de 1 ms. Assim, foi possível sincronizar as duas fontes e, como será mostrado posteriormente, este pequeno defasamento não gerou um erro que impedisse a convergência do processo de identificação de parâmetros.

3.3 Resultados

Uma vez que os dados foram coletados e sincronizados de maneira satisfatória, estes puderam ser utilizados no procedimento de estimação dos parâmetros do modelo. Para localizar uma região que está próxima do mínimo global da função a ser otimizada e tornar viável o uso de métodos tradicionais de otimização, utilizou-se um algoritmo genético implementado pela função *ga* do *MATLAB*. Empiricamente, escolheu-se uma população de 20 indivíduos e limite de 10 mil gerações. Após o final da execução do algoritmo, utilizou-se o método *Quasi-Newton* por meio da função *fmincon* do *MATLAB* para alcançar o mínimo global. No processo de otimização foram impostas as seguintes restrições para os ângulos de alinhamento: $\phi, \psi \in [-360^\circ, 360^\circ]$.

Com os procedimentos descritos anteriormente calibrou-se os girômetros a partir da função definida pela Equação (10). Os parâmetros encontrados são mostrados na Tabela 1.

Como pode-se observar pelas figuras 4 e 5, que mostram a comparação entre o valor de saída de um dos girômetros estimado pelo modelo e o valor medido para os dados utilizados na estimação dos parâmetros, a otimização consegue achar parâmetros aparentemente bons para esse conjunto de dados. Na Figura 4 não é possível notar visualmente que ha uma diferença de fase entre os sinais estimado e real. Este resultado é, aparentemente, um indício de que o método de sincronização é suficiente para resolver este problema. No entanto, uma periodicidade no erro mostrado na Figura 5 indica que este método ainda pode ser melhorado.

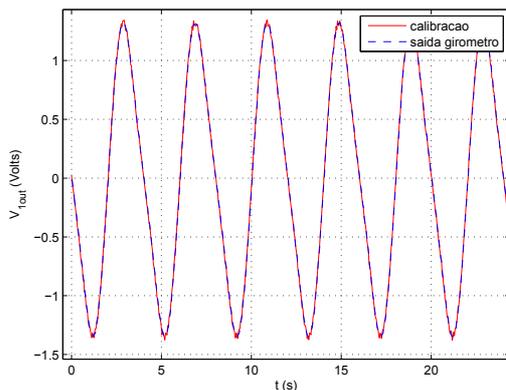


Figura 4: Resultado da calibração do girômetro 1. Comparação entre a saída real do girômetro e a saída estimada pelo modelo para os dados utilizados no processo de estimação de parâmetros.

3.4 Análise dos Resultados

Para avaliar o erro, foram gerados histogramas com os valores dos erros residuais, $E_j = (V_{k_{out}}^j - V_k^j)$. Um exemplo de histograma para

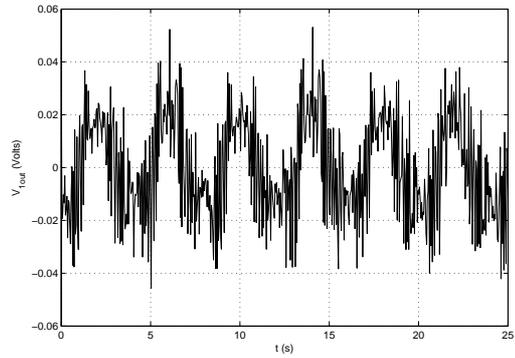


Figura 5: Erro do resultado da calibração do girômetro 1. Subtração entre a saída real do girômetro e a saída estimada pelo modelo para os dados utilizados no processo de estimação de parâmetros.

$k = 1$ é mostrado na Figura 6. Os resíduos do processo de calibração podem ser gerados por vários motivos: ruído na saída dos girômetros, oscilações mecânicas do manipulador e do suporte que prende a IMU a garra, incertezas na taxa de amostragem, imprecisão no sincronismo entre os sinais, erros de modelagem do manipulador, e imprecisões numéricas no processo de otimização. Trabalhos futuros terão como objetivo apresentar um modelo de medição que considere todos estes efeitos. No entanto, aparentemente, histogramas como o da Figura 6 podem ser utilizados para verificar a qualidade da calibração.

Como pode-se observar pela Tabela 1, a raiz quadrada do erro quadrado médio, E_{RMS} , para os girômetros 2 e 3 resultaram em valores cerca de 10 vezes maiores ao do erro do eixo 1. Acredita-se que as velocidades angulares aplicadas aos eixos destes girômetros durante o ensaio destinado a calibração não foi suficiente. Essa conclusão pode ser tirada comparando-se os respectivos valores com as velocidades em cada eixo da garra. No girômetro que está quase alinhado ao eixo \hat{k}_E do referencial da garra apresentou velocidades máximas em torno de 4,0 rad/s, enquanto que nos demais

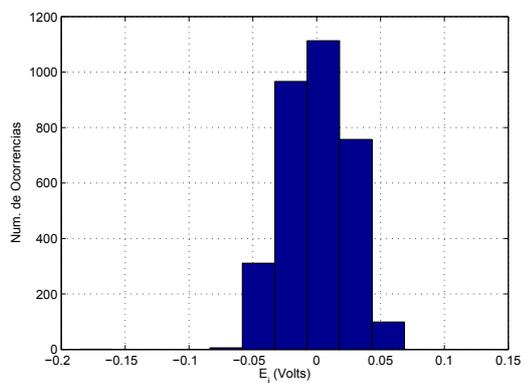


Figura 6: Histograma do erro na estimação dos parâmetros para o girômetro 1.

Tabela 1: Parâmetros estimados para a calibração dos girômetros

Acel. k	S_k (s/rad)	δ_k (V)	ϕ_k ($^\circ$)	ψ_k ($^\circ$)	ERR_{RMS} (V)
1	0,3401	-0,0126	-98,8645	-36,7869	0,0026
2	-0,3908	0,0485	0,4751	70,0565	0,0457
3	0,3482	0,1004	-0,3867	-23,6221	0,0412

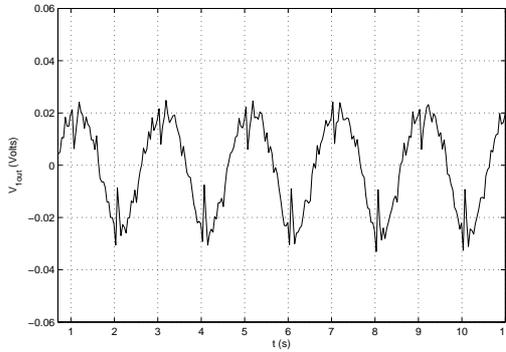


Figura 7: Validação da calibração do girômetro 1. A figura mostra o erro entre a saída real do girômetro e a saída estimada pelo modelo para dados diferentes daqueles usados na identificação de parâmetros.

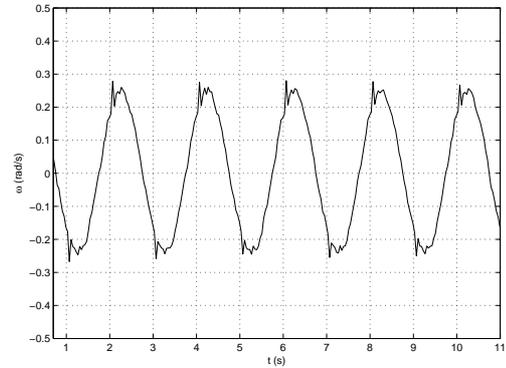


Figura 9: Erro entre o valor medido por meio da função de calibração encontrada para o girômetro 1 e o eixo Z da IMU, que utiliza calibração embarcada.

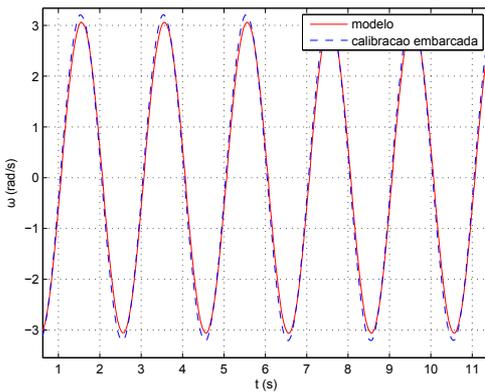


Figura 8: Comparação entre o valor medido por meio da função de calibração encontrada para o girômetro 1 e o eixo Z da IMU, que utiliza calibração embarcada.

eixos a velocidade máxima se limitou a 1,5 rad/s. Como mencionado anteriormente, estudos futuros devem se preocupar em gerar trajetórias que excitam adequadamente todos os girômetros.

Para validar os parâmetros de calibração encontrados para o girômetro 1, repetiu-se o movimento definido pela Equação (11), porém com apenas o eixo 4 do manipulador habilitado, frequência igual a 0,5 Hz e amplitude igual 60°. Esse movimento gerou velocidades angulares em torno de 3,0 rad/s. Analisando o gráfico da Figura 7, notamos que os parâmetros encontrados são suficientemente bons, visto o pequeno erro entre a tensão estimada e a tensão fornecida pelo girômetro.

Em relação aos dados da Tabela 1, observe

que além dos parâmetros de linearidade e polarização, foram determinados os ângulos de desalinhamento dos eixos dos girômetros. Uma análise destes dados indica que o eixo do girômetro 1 está a 87,9° do eixo do girômetro 2 e a 98,24° do girômetro 3. Por sua vez o ângulo entre os eixos dos girômetros 2 e 3 é de 93,68°. Para cálculo destes ângulos é determinado o vetor ${}^E P_k(\phi_k, \psi_k)$ para cada girômetro por meio dos ângulos indicados na Tabela 1. Os ângulos entre os vetores são então calculados como o arco-cosseno dos produtos escalares entre cada par de vetores. Este resultado mostra que os girômetros, que, a princípio, deveriam estar ortogonais entre si, possuem pequenos desalinhamentos em relação à orientação ideal.

Outra análise realizada, foi a comparação entre a calibração realizada pelo fabricante da IMU, embarcada no sistema, e os parâmetros encontradas pelo método proposto nesse artigo. Usando a mesma trajetória utilizada para gerar a Figura 7, durante a qual também foram coletados dados calibrados, foram comparados os dados de velocidade angular entregues pela IMU com aqueles calculados com o modelo estimado a partir da tensão medida pelo girômetro. Neste modelo, foram utilizados somente os parâmetros S_k e δ_k estimados, sendo que os ângulos de desalinhamento espacial foram ignorados. O resultado da comparação é mostrado nas figuras 8 e 9. Nota-se nestas figuras um erro percentual maior que os erros encontrados na comparação entre níveis de tensão. Isto, provavelmente, ocorre pelo desalinhamento entre o eixo do girômetro e o eixo da IMU, que foram considerados coincidentes com os dos girômetros. Como

aparentemente existe um desalinhamento entre estes eixos, um segundo processo de calibração seria necessário para determiná-lo. Note que os ângulos ψ_k e ϕ_k na Equação (8) representam o desalinhamento entre os eixos girômetros e o sistema de referência da garra do robô. Os desalinhamentos entre o sistema de referência da IMU, o sistema de referência do robô e o eixos dos girômetros ainda precisam ser considerados.

4 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou uma metodologia para obtenção da curva de calibração de girômetros. Os resultados iniciais apresentados indicam o potencial da metodologia para calibração destes sensores. A principal vantagem do método é a utilização de manipuladores robóticos como instrumento de calibração. Robôs como estes são, geralmente, mais acessíveis a universidades, centros de pesquisa e pequenas indústrias do que sistemas dedicados para calibração. Assim, a utilização de manipuladores pode reduzir o custo do desenvolvimento de sensores e unidades de medição inercial.

No entanto, a metodologia apresentada no artigo ainda é preliminar. Várias questões ainda precisam ser endereçadas. Entre as principais questões, está a avaliação de uma trajetória ideal que gere velocidades angulares adequadas em todos os girômetros em calibração. Outro ponto importante é a determinação de uma equação de medição que indique como os diversos erros envolvidos no processo contribuem para o resultado final de calibração. Por exemplo, veja que método assume que a velocidade angular da garra do robô é exata. No entanto, esta é calculada a partir dos encoders do robôs, que são susceptíveis a erros, e da Matriz Jacobiana, que é montada por meio de parâmetros incertos.

Uma vez que o procedimento de calibração dos girômetros esteja fechado este será integrado ao método de calibração de acelerômetros e magnetômetros já publicado (Renk et al., 2005) para viabilizar a calibração completa de todos os sensores de uma unidade de medição inercial. Neste ponto, será necessário o desenvolvimento de um método para determinação da matriz de transformação entre os referências dos acelerômetros, magnetômetros e girômetros. Esta será uma tarefa desafiadora, uma vez que atualmente os acelerômetros são calibrados utilizando-se o robô em velocidades muito baixas, para garantir que somente a aceleração da gravidade esteja agindo sobre os sensores, enquanto que velocidades mais altas são necessárias para excitar os girômetros.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FA-

PEMIG). Adriano Mourão e Guilherme Pereira são bolsistas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem a Jullierme Dias, Rogério Lima e Tiago Arruda pelas dicas e sugestões durante o desenvolvimento do projeto.

Referências

- Aslan, G. and Saranlı, A. (2008). Characterization and calibration of mems inertial measurement units, *Proceedings of the 16th European Signal Processing Conference*, Lausanne, Switzerland.
- Barbour, N. and Schmidt, G. (2001). Inertial sensor technology trends, *IEEE Sensors Journal* **1**(4): 332–339.
- Hall, J. J. and Williams, R. L. (2000). Case study: Inertial measurement unit calibration platform, *Journal of Robotic Systems* **17**(11): 623–632.
- Lee, D., Lee, S., Park, S. and Ko, S. (2011). Teste and error parameter estimation for mems - based low cost imu calibration, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **12**(4): 597–603.
- Renk, E., Rizzo, M., Collins, W., Lee, F. and Bernstein, D. (2005). Calibrating a triaxial accelerometer-magnetometer - using robotic actuation for sensor reorientation during data collection, *IEEE Control Systems* **25**(6): 86–95.
- Shin, E.-H. and El-Sheimy, N. (2002). A new calibration method for strapdown inertial navigation systems, *Z. Vermess* **127**: 1.
- Silva, L. E. R., Torres, L. A. B. and Pereira, G. A. S. (2011). Calibração de acelerômetros utilizando um robô manipulador industrial, *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1025–1030.
- Skog, I. and Händel, P. (2006). Calibration of a mems inertial measurement unit, *Proceedings for the XVII IMEKO World Congress*, Rio de Janeiro.
- Spong, M., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*, John Wiley & Sons.
- Syed, Z. F., Aggarwal, P., Goodall, C., Niu, X. and El-Sheimy, N. (2007). A new multi-position calibration method for mems inertial navigation systems, *Measurement Science and Technology* **18**(7): 1897.