



DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES

30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Sintonia ótima do filtro complementar aplicado na junção de sensores inerciais

Talysson Manoel de Oliveira Santos¹

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSJ, São João del-Rei, MG

Rodrigo Augusto Ricco²

Departamento de Engenharia Elétrica, UFOP, João Monlevade, MG

Érika Lorena Fonseca Costa de Alvarenga³

Departamento de Ciências Naturais, UFSJ, São João del-Rei, MG

Luciano Rivaroli⁴

Departamento de Ciências Naturais, UFSJ, São João del-Rei, MG

Álvaro César de Oliveira Penoni⁵

Departamento das Ciências da Educação Física e Saúde, UFSJ, São João del-Rei, MG

Márcio Falcão Santos Barroso⁶

Departamento de Engenharia Elétrica, UFSJ, São João del-Rei, MG

Resumo. Os sensores inerciais apresentam desempenho indesejado do ponto de vista de metrologia quando atuam em separado na medição de posição angular. Filtros normalmente são utilizados para fundir a informação de cada um desses sensores afim de prover medições com maior precisão e exatidão. Neste trabalho é proposta a sintonia do Filtro Complementar por meio do método heurístico Estratégias de Evolução. Resultados experimentais são apresentados, os quais evidenciam a qualidade do Filtro Complementar sintonizado pelo algoritmo de otimização.

Palavras-chave. Sensores Inerciais, Filtro Complementar, Otimização por Estratégias de Evolução, Análise Angular Tridimensional.

1 Introdução

Os sensores inerciais microeletromecânicos (MEMS) são largamente utilizados em aplicações voltadas para a robótica e para a medição de movimento humano. No trabalho de [2] foi utilizado para controle de um manipulador robótico, em [1] para apoio de

¹talyssonsantos1@gmail.com

²ricco@deelt.ufop.br

³erika.fisio@ufs.j.edu.br

⁴lucianorivaroli@gmail.com

⁵alvaropenoni@ufs.j.edu.br

⁶barroso@ufs.j.edu.br

navegação autônoma, em [5] para um sistema microcontrolado de monitoramento de atividades esportivas, em [3] para estimação de trajetórias terrestres e em [6] para detecção de movimento de membros superiores humanos.

Apesar de serem largamente utilizados, cada um dos sensores inerciais conhecidos, individualmente, não apresentam as características metrológicas adequadas para a sua utilização. Entre os problemas apresentados estão a deriva, a alta variância e a incerteza associada a medição [1, 3].

O ideal para utilização desses sensores de medição é ter a possibilidade de incorporar as melhores qualidades de cada um para, em conjunto, ter um instrumento com características metrológicas mais adequadas. Como solução, muitos trabalhos têm optado pelo uso de filtros que fazem a fusão dos dados provenientes destes sensores. Os principais filtros utilizados são o Filtro Complementar (FC) e o Filtro de Kalman (FK).

Neste primeiro trabalho, devido à facilidade de aplicação, foi utilizado o FC para fundir as medições de três sensores inerciais, a saber, giroscópio, acelerômetro e magnetômetro. O objetivo de se utilizar tais sensores é obter medição tridimensional da posição angular. Embora o FC seja de fácil aplicação, a escolha do parâmetro do filtro é baseada em requisitos de projeto que dão indicativo da faixa desse parâmetro. Assim, fica a critério do usuário escolher o melhor parâmetro dentro dessa faixa. Dessa forma, como alternativa para a sintonia do parâmetro do FC é proposto o uso do método heurístico de Estratégias de Evolução. Portanto, a contribuição desse trabalho é estimar o parâmetro ótimo do filtro baseado nos requisitos de projeto de forma automática.

2 Problematização

A Figura 1 ilustra o sistema de coordenadas padrão industrial *NED* (*North, East, Down*), utilizado como referência neste trabalho para medição angular.

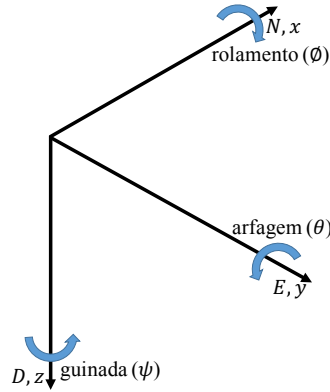


Figura 1: Neste sistema de coordenadas ϕ é o ângulo em torno do eixo x , seu sentido positivo aponta para o norte (N). θ é o ângulo em torno do eixo y , seu sentido positivo aponta para o leste (E). ψ é o ângulo em torno do eixo z , seu sentido positivo aponta para baixo (D).

Os problemas metrológicos que o giroscópio, o acelerômetro e o magnetômetro apresentam são descritos a seguir.

2.1 Giroscópio

O giroscópio MEMS é um sensor que mede velocidade angular. A posição angular em cada um dos três eixos pode ser obtida integrando-se os valores da velocidade angular em relação ao tempo. Para pequenos intervalos de tempo a integral numérica pode ser aproximada por

$$x_i = x_{i-1} + \omega_i T, \quad (1)$$

em que, x é a posição angular, i é instante de tempo, ω é a velocidade angular e T é o período de amostragem. O giroscópio é capaz de medir posição angular nos três eixos.

2.2 Acelerômetro

O acelerômetro mede aceleração linear e também pode medir a aceleração da gravidade. Em muitas aplicações, como neste trabalho, o acelerômetro é utilizado como um inclinômetro. Isto é possível devido a capacidade do sensor de medir aceleração da gravidade. A projeção dessa aceleração nos eixos do acelerômetro pode ser utilizada para medir variação angular. As posições angulares de ϕ e θ são dadas respectivamente por

$$\phi_a = \text{sen}^{-1}(a_y), \quad (2)$$

$$\theta_a = \text{tg}^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right), \quad (3)$$

em que a_x , a_y e a_z são as componentes da aceleração no eixo x , y e z .

O uso deste sensor não permite medir o ângulo de guinada, uma vez que as componente da aceleração da gravidade nos eixos não são alteradas para este movimento.

2.3 Magnetômetro

O magnetômetro é um sensor que mede direção, sentido e magnitude do campo magnético. Em aplicações que envolvem a orientação de objetos, bem como a medição do movimento humano, esse sensor pode ser usado para determinar o ângulo de guinada pela medição do Campo Magnético da Terra (CMT). Entretanto, para diversas aplicações a inclinação do sensor varia, e, por isso, deve-se compensá-la para que possa calcular o ângulo de guinada corretamente. Neste trabalho esta compensação foi feita por meio dos ângulos de inclinação obtidos pelo acelerômetro, aplicando-se

$$\psi_m = \text{tg}^{-1} \left(\frac{Z_m \text{sen}(\phi_a) - Y_m \cos(\phi_a)}{X_m \cos(\theta_a) + Y_m \text{sen}(\theta_a) + Z_m \text{sen}(\theta_a) \cos(\phi_a)} \right), \quad (4)$$

em que X_m , Y_m , Z_m são as componentes do campo magnético no eixo x , y e z .

As Figuras 2(a), 2(b) e 2(c) ilustram o giroscópio, o acelerômetro e o magnetômetro operando isoladamente para medir posição angular em 0° . Embora seja possível medir a posição angular nos três eixos utilizando apenas o giroscópio, analisando a Figura 2,

observa-se que este sensor apresenta *drift*, ou seja, ocorre acúmulo de erros de posição angular pela integração numérica de ruídos de baixa frequência e faz com que o valor de offset varie com o tempo. Por outro lado, o acelerômetro e o magnetômetro apresentam valores instáveis, sendo esta instabilidade acentuada em altas frequências. Portanto, a utilização destes três sensores operando isoladamente é inviável.

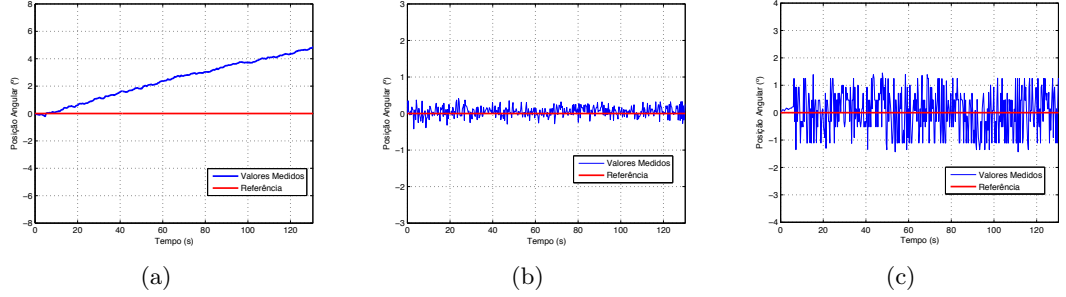


Figura 2: Medição da posição angular em 0° para (a)giroscópio, (b)acelerômetro e (c)magnetômetro, ambos em azul. Em vermelho é apresentado o valor de referência.

3 Materiais e Métodos

3.1 Fusão dos sensores: Filtro complementar

Assim como demonstrado ao longo da Seção 2, as medições provenientes de diferentes instrumentos podem apresentar características particulares de erro. Nesse sentido, o filtro complementar visa explorar características da resposta de dois sensores, combinando os sinais dos dois instrumentos para medir grandezas com o menor erro possível.

A Figura 3 mostra um fluxograma que sintetiza a implementação do filtro complementar, em que ω_i é a velocidade angular obtida pelo giroscópio, X_{ai} é a posição angular informada pelo acelerômetro e X_{mi} é a posição angular calculada pelo magnetômetro. O valor de α deve estar entre 0 e 1 e é o único parâmetro a ser otimizado. O desempenho do filtro complementar depende unicamente do parâmetro α .

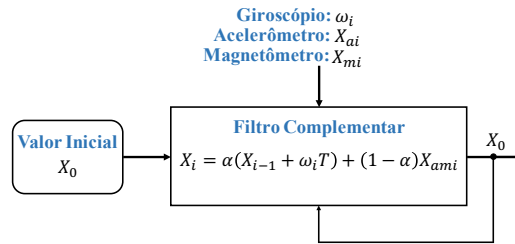


Figura 3: Diagrama esquemático do Filtro Complementar.

Neste trabalho serão utilizados três filtros complementares, um para cada ângulo. O valor ótimo de α foi encontrado a partir do algoritmo de otimização descrito a seguir.

3.2 Otimização de α pelo modelo Heurístico Estratégias de Evolução

Uma característica importante das estratégias evolutivas é a auto-adaptação dos parâmetros da estratégia durante o processo evolutivo, através da introdução dos mesmos na representação genética dos indivíduos [4]. A geração de novos indivíduos utilizada neste trabalho é dada por

$$x^{i+n} = x^i + 0,01Nx^i, \quad (5)$$

em que n é o número inicial de indivíduos de uma população, i varia de 1 até n , x^i são os n indivíduos iniciais, x^{i+n} são os n indivíduos que estão sendo gerados, 0,01 é a taxa de mutação adotada neste trabalho e N é uma função densidade de probabilidade utilizada para o processo de auto-adaptação dos indivíduos. A Figura 4 sintetiza o funcionamento do algoritmo ES.

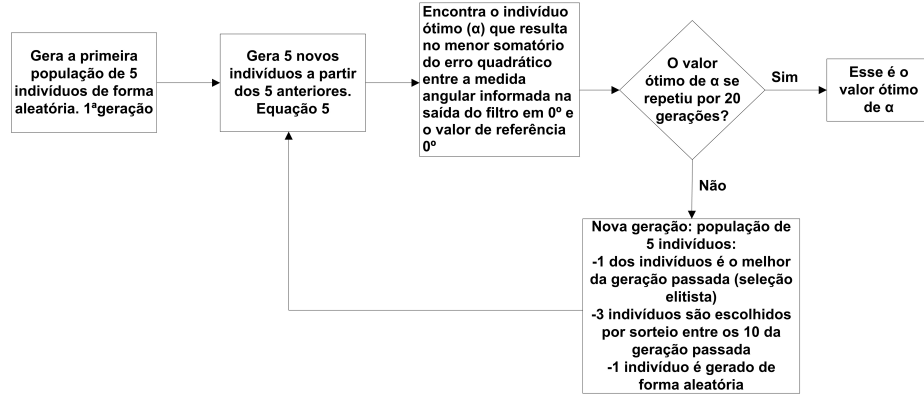


Figura 4: Fluxograma do algoritmo ES.

4 Resultados

Para encontrar o valor ótimo de alfa para cada um dos 3 filtros, o algoritmo de otimização foi executado 20 vezes com o mesmo conjunto de dados para analisar se o algoritmo desenvolvido apresenta robustez. Se o algoritmo retorna valores de alfa com grande variação, significa que o algoritmo não é robusto e está convergindo para soluções ótimas locais. Caso contrário o algoritmo é robusto. Os resultados podem ser vistos na Tabela 1. Analisando os resultados da Tabela 1 observa-se que os desvios padrões dos valores de α para os 3 filtros foram baixos. Portanto, o algoritmo é robusto.

Tabela 1: Resultados do algoritmo ES.

FC	Média dos valores de α	Desvio padrão dos valores de α
Rolamento	0,8103	0,0135
Arfagem	0,8512	0,0119
Guinada	0,9359	0,0121

As Figuras 5(a), 5(b) e 5(c) ilustram o desempenho dos sensores trabalhando separadamente e acoplados pelo filtro complementar otimizado para medir os ângulos de rolamento,

arfagem e guinada em 0° . O desempenho das análises ilustradas na Figura 5 foram sintetizados na Tabela 2.

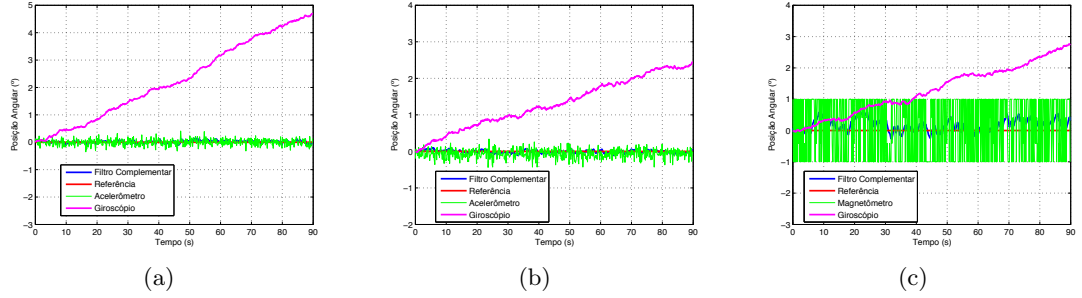


Figura 5: Medição da posição angular em 0° do ângulo de (a) ϕ , (b) θ e (c) ψ . Em (a) e (b), verde são as leituras do acelerômetro e em (c) do magnetômetro. Em ambas as representações em magenta estão as leituras do giroscópio, azul do FC ótimo e em vermelho é apresentado o valor de referência.

Tabela 2: Resultados da medida angular em 0° com alfa ótimo.

Rolamento			Arfagem			Guinada		
Medida	Média	Desvio	Medida	Média	Desvio	Medida	Média	Desvio
Acel.	-0,106	0,1185	Acel.	-0,093	0,1286	Magnet.	-0,1153	0,9827
Girosc.	-2,2817	1,2270	Girosc.	1,3126	0,6789	Girosc.	1,1410	0,7837
FC	-0,019	0,047	FC	-0,005	0,040	FC	0,0976	0,1757

Foi desenvolvido um equipamento de teste angular composto de uma parte móvel e uma parte fixa com um transferidor acoplado. Com este equipamento, o sistema de medição foi testado para 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$. A Curva de erros na faixa de operação de -60° a 60° em torno do eixo X pode ser vista na Figura 6.

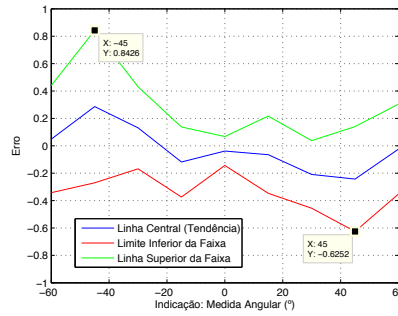


Figura 6: Curva de Erros: A linha central, em azul, é a tendência do instrumento. A linha superior é a soma da tendência com a repetitividade do instrumento e está representada de verde. Em azul, a curva inferior é subtração da tendência pela repetitividade do instrumento. O calculo da repetitividade do sistema de medição foi realizado com 15 graus de liberdade, 95,45% de probabilidade e coeficiente t de Student 2,181.

5 Discussões

Analisando os dados da Tabela 5 observa-se a eficiência do filtro complementar em combinar as medidas provenientes de dois sensores distintos e obter uma medição com melhor precisão. Houve redução superior a 60% do desvio padrão para medição angular nos 3 eixos, as medidas ficaram muito mais precisas. Além disso, as médias das medidas ficaram mais próximas do valor real, ou seja, o sistema de medição ficou mais exato.

A curva de erros ilustrada na Figura 6 mostra que o instrumento apresenta erros aceitáveis ao longo de toda a sua faixa de trabalho. Em torno de $\pm 45^\circ$ é a região onde o instrumento apresenta maior erro de medição e espera-se que este erro seja inferior a 0,8426.

O método heurístico Estratégias de Evolução apresentou bons resultados para otimização do filtro complementar, conforme expresso na Tabela 2 e validado devido aos bons resultados apresentados pela utilização do filtro complementar otimizado.

Como continuação, o instrumento desenvolvido neste trabalho será utilizado para análise angular tridimensional do joelho humano, com o intuito de auxiliar em diagnósticos para atuar na prevenção e tratamento de lesões no joelho. Ademais, testes deverão ser realizados com o FK a fim de reforçar o desempenho obtido neste trabalho com FC com sintonia ótima.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) pela disponibilidade de infraestrutura física e ao Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica (PPGEL).

Referências

- [1] A. M. Mori, O uso de sistema inercial para apoiar a navegação autônoma, Dissertação de Mestrado: Universidade de São Paulo, (2013).
- [2] G. L. Reis, M. A. Abdalla, J. D. Nolasco, L. F. F. Souza e M. F. S. Barroso, E. B. Pereira, Controle de Posição de um manipulador robótico utilizando sensores inerciais e eletromiografia, CBA, p. 1514–1521, (2014).
- [3] D. D. S. Santana, Estimação de trajetórias terrestres utilizando unidade de medição inercial de baixo custo e fusão sensorial, Dissertação de Mestrado: Universidade de São Paulo, (2005).
- [4] H. Schwefel e G. Rudolph, Contemporary evolution strategies, Springer-Verlag, p. 893–907, (1995).
- [5] Y. H. H. Roa, Desenvolvimento de um sistema microcontrolado para monitoramento de atividades esportivas baseado em sensores microeletromecânicos de aceleração e giro, Dissertação de mestrado: Universidade Estadual de Campinas, (2009).
- [6] H. Zhou e H. Hu, Inertial sensors for motion detection of human upper limbs, Sensor Review, 27(2), pp. 1160–1170, (2007), DOI: 10.1108/02602280710731713.