

FILTRO COMPLEMENTAR APLICADO A MEDIDA DE INCLINAÇÃO DE PLATAFORMAS MÓVEIS

Aline Grotewold Bueno¹; Rodrigo Alvite Romano²

¹Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

²Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Neste trabalho é visada a obtenção de um medidor de inclinação para aplicação em dispositivos de livre movimentação. É proposto um filtro complementar que combine a leitura de um acelerômetro para dados de baixa frequência e a integral da leitura de um giroscópio para alta frequência. Para a certificação da medida serão utilizados como base os dados recolhidos de um potenciômetro cerâmico que receberá as mesmas variações dos sensores supracitados. Este método pretende, através de mais de um sensor, diminuir o erro, aumentar tanto a confiabilidade — através de informações redundantes — quanto à observabilidade — pois informações complementares permitem a aquisição de certos parâmetros que não seriam detectados por um único sensor.*

Introdução

A interpretação correta de dados de angulação tem uma grande utilidade em áreas como: aeroespacial, robótica, navegação e até para análise de movimentos humanos. Considerando a variedade de soluções tecnológicas existentes para a medida de angulação, sensores inerciais — como o giroscópio e acelerômetro utilizados nesse estudo — têm a vantagem de serem completamente invariáveis devido à mudança de ambiente ou localização, precisando apenas de ajustes na leitura (Madgwick, Vaidyanathan e Harrison, 2010).

O termo “filtro complementar” é normalmente utilizado no meio acadêmico como referência a qualquer algoritmo que tenha como objetivo a fusão de dados redundantes ou similares de diferentes sensores para alcançar uma estimativa ótima de uma determinada variável. Este filtro opera no domínio da frequência e pode ser definido pelo uso de duas ou mais funções de transferência as quais complementam umas as outras. Num sistema típico de duas entradas de dados, como este, uma delas proverá informação com ruído de alta frequência, que será filtrada através de um filtro passa-baixas. A outra produzirá dados com ruído de baixa frequência, sendo, portanto, filtrados através de um filtro passa-altas. Se estes filtros são matematicamente complementares, então o sinal filtrado será a reconstrução completa da variável sendo monitorada, eliminando os ruídos.

Este método de abordagem de dados torna o tratamento de sinais digitais mais próximos à realidade, assim como animais se desenvolveram utilizando este tipo de fusão para melhorar suas chances de sobrevivência (unindo os dados obtidos através de sua visão, audição, seu olfato e tato) (Euston, et al., 2007).

Materiais e Métodos

Neste projeto foram utilizados inicialmente três sensores: um giroscópio, um acelerômetro e um potenciômetro (este não terá uma descrição detalhada, pois foi utilizado apenas para a confirmação da calibração dos outros sensores e não tem importância no estudo).

O giroscópio mede a velocidade angular e, conhecendo as condições iniciais, pode ter seu sinal integrado em relação ao tempo para gerar a orientação do sensor. Porém, essa integração levará a um erro acumulado ao passar do tempo. Portanto, este sensor sozinho não produz dados totalmente confiáveis para a definição da orientação.

O acelerômetro mede em relação ao campo gravitacional da Terra, provendo dados precisos da angulação. Porém, estes sensores são extremamente susceptíveis a altos níveis de ruído — por exemplo, se há aceleração, devido ao movimento do corpo, no sensor, sua leitura já está comprometida (Baerveldt e Klang, 1997).

A obtenção dos dados foi realizada através da plataforma do LabView® e transferidos para o MatLab® para a adequação e simulação do filtro em questão. A aquisição supracitada foi efetuada através de uma placa *Elvis II* da *National Instruments* presente na Escola de Engenharia Mauá. Os dados foram salvos em um arquivo de texto e inseridos na forma gráfica para que pudessem ser utilizados pelo outro programa. No MatLab®, os dados foram tratados para poderem ser utilizados em sua ferramenta *Simulink*®, a qual é uma interface gráfica que facilitou a implementação de tal filtro.

O aferimento dos sensores foi realizado através da comparação da leitura destes com uma curva de variação de tensão por angulação de um potenciômetro instalado no eixo do modelo, comparando valores e obtendo as dinâmicas as quais foram inseridas no filtro por meio de ganhos (ambos) e na integração do giroscópio.

Nesta pesquisa foram utilizados o giroscópio ADXRS401 da fabricante *Analog Devices* e o acelerômetro MMA1260EG da fabricante *Freescale Semiconductor*. Os fatores de escala e frequências de corte foram obtidos em seus *datasheets* e tiveram sua validade conferida por um potenciômetro engastado no eixo do modelo utilizado (Figura 1).

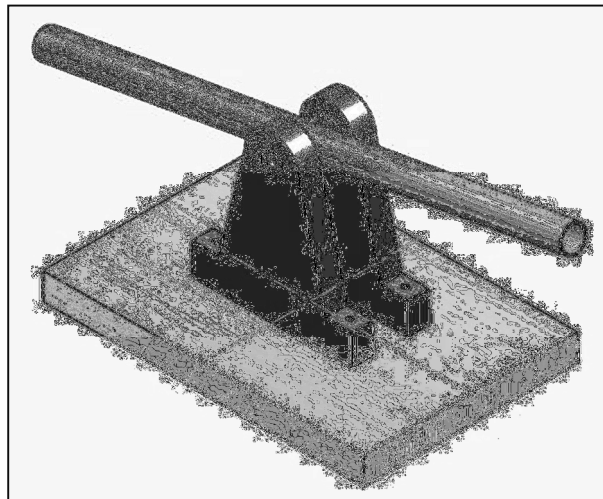


Figura 1. Modelo utilizado para simulações.

O giroscópio, como dito anteriormente, mede a velocidade angular e sua precisão é normalmente boa. Portanto, a integração do valor obtido pelo giroscópio em relação ao tempo provém uma boa aproximação da informação angular, se provida a posição inicial do sistema e o sensor praticamente sem ruído. O processo de integração também age como um filtro passa-baixas e reduz o já baixo ruído de alta frequência gerado. Assim tem-se:

Sendo o valor da velocidade obtida Porém a velocidade obtida através do sensor não é ideal: ao integrá-la também será integrado seu ruído em estado estacionário, que também é chamado de *bias*. Tal integração produzirá um erro crescente na estimação do ângulo. Como este *bias* não é constante, não é possível simplesmente subtraí-lo. Portanto, é necessária a utilização de outro sensor para corrigir este erro introduzido pelo processo de integração.

Com esse intuito, acrescenta-se um acelerômetro. Este sensor mede tanto a aceleração quando forças induzidas pela gravidade, ele geralmente tem bastante ruído e precisa ser filtrado. Utilizar dois eixos da leitura seria útil, porém desnecessário: com estes dados seria possível usar a trigonometria para encontrar a tangente inversa da leitura dos dois eixos e calcular o ângulo. Porém, sem a outra leitura, ainda é possível obter o ângulo com o eixo X apenas aplicando seno ou cosseno, já que a amplitude da gravidade é conhecida. Portanto, para ângulo em graus (Clifford e Gomez, 2005):

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1g}{z}\right) * \frac{180}{\pi}$$

Sendo z a leitura que o eixo normal ao acelerômetro produz para tal angulação. Para plataformas móveis, o ângulo de trabalho não varia mais que $\pm 30^\circ$, portanto é possível fazer uma aproximação de que (Colton, 2007):

$$\text{sen}(\theta) \approx \theta$$

Contudo, o acelerômetro falha quando o sistema é submetido a uma aceleração qualquer. Há também o ruído supracitado, que um filtro passa-baixas pode até diminuí-lo, porém não conseguirá eliminar o *bias* causado pela aceleração do sistema. (Tuck, 2007) Outro importante fator é que um filtro passa-baixas adiciona um atraso na resposta do sistema, o que não é interessante na grande maioria das aplicações.

Assim é possível verificar que: o giroscópio produz uma estimativa eficaz em situações dinâmicas, sendo estas num curto período de tempo para geração de menor *bias*, e o acelerômetro gera sinais com boa precisão em situações estáticas. Portanto, é possível concluir que a fusão dos melhores pontos dos dois é o mais eficaz a ser feito. Com isso, é apresentado, como alternativa mais simples ao conhecido filtro de Kalman, o filtro complementar.

Para uma filtragem complementar, deve-se ter em mente que, sendo $HP(s)$ o filtro passa-altas a qual será submetido o giroscópio e $LP(s)$ o filtro passa-baixas através do qual a leitura do acelerômetro será modificada, a soma dos dois filtros deve ser um, ou seja, serem matematicamente complementares (Euston et al., 2007).

$$HP(s) + LP(s) = 1$$

Assim, ao utilizar uma frequência de *cut off* 0,5 Hz para ambos os filtros, tem-se:

$$LP(s) = \frac{0,5}{s + 0,5}$$

e

$$HP(s) = \frac{s}{s + 0,5}$$

Como é possível visualizar na Figura 2, estes filtros são complementares, obedecendo aos requisitos do sistema. Criando um filtro complementar de fase 0° e ganho unitário.

Através do *datasheet* do giroscópio do modelo supracitado, adquire-se que sua largura de banda é de 40 Hz. Portanto, a função de transferência da integração do giroscópio incluindo a dinâmica de tal componente é:

$$I(s) = \frac{1}{314} \cdot \frac{s + 314}{s}$$

Com estes dados foi possível montar uma interface gráfica (Figura 3) para simulação através da ferramenta simulink® no MatLab® para efetuar testes e simulações.

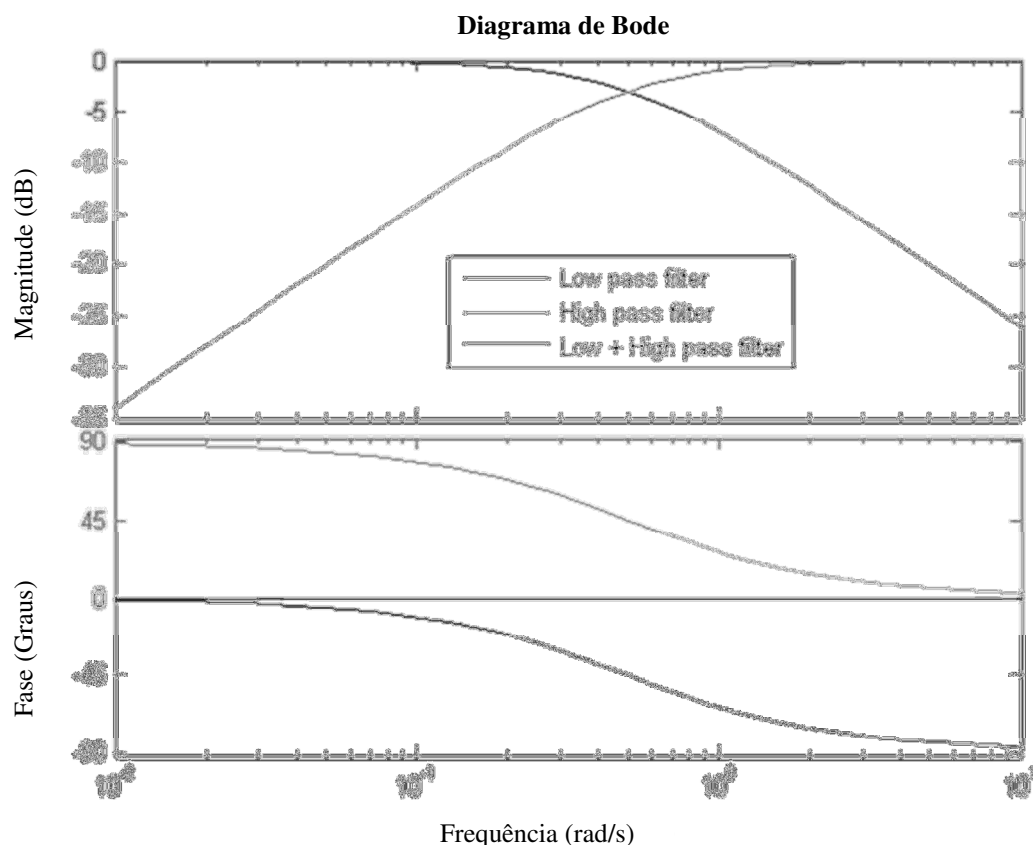


Figura 2. Diagrama de Bode dos filtros.

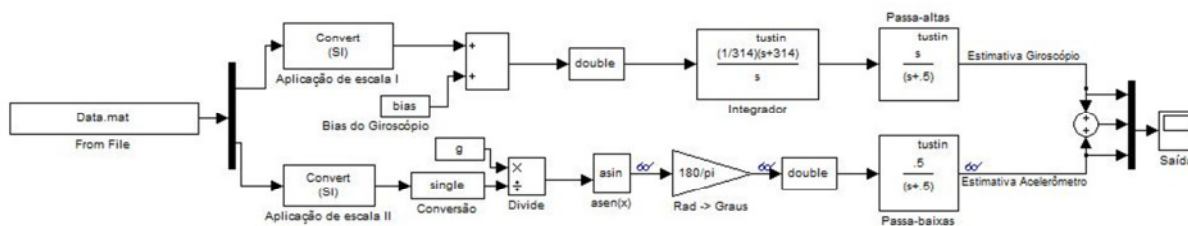


Figura 3. Modelo de simulação do Simulink®.

Resultados e Discussão

Com o modelo mecânico e eletrônico em mãos, foi possível obter uma simulação acurada do funcionamento do sistema e provar tanto a exatidão de medida que provém da filtragem complementar como as falhas que proporcionariam a medida de apenas um sensor. A simulação a seguir foi feita durante vinte segundos e amostras foram definidas a cada milésimo de segundo.

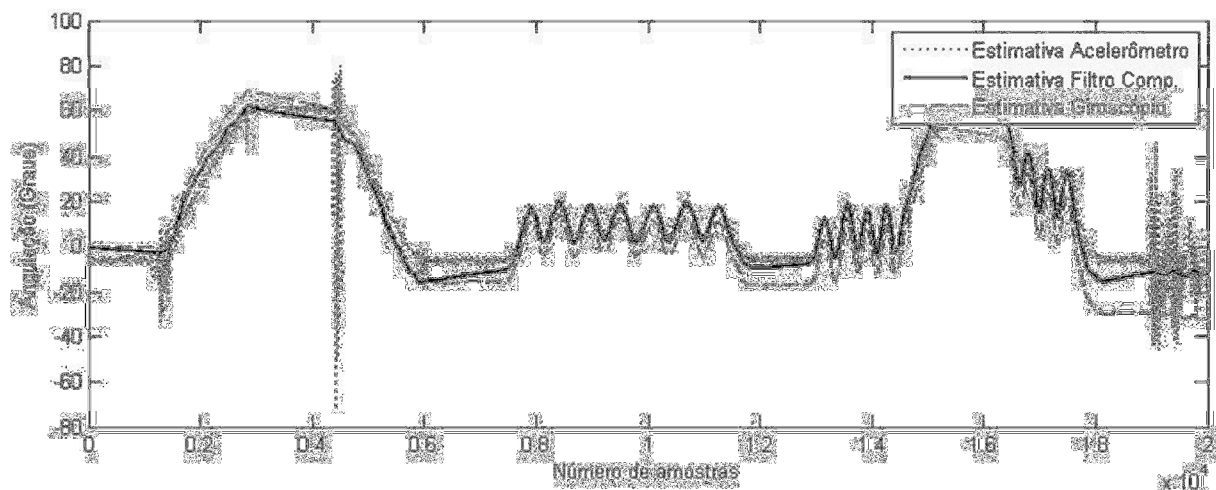


Figura 4. Simulação em regime permanente.

Analisando a figura acima, tem-se que este filtro apresenta resultados bons, porém o *bias* do giroscópio acaba por gerar um erro em rampa crescente que pode ser observado no final da simulação. Pela plataforma estar parada sobre a bancada de trabalho durante a simulação, não estava sob influência de nenhuma aceleração externa, portanto as medições chegam bem próximo ao ideal com o acelerômetro (exceto durante algumas medidas mas, como o tempo de amostragem é muito pequeno, numa aplicação real esta mudança não influenciaria no estado do sistema).

Para prover melhores informações, o modelo mecânico foi submetido a mudanças de posição com variação de velocidade durante outro período de amostragem, o qual é mostrado na Figura 5. É claramente visível o erro ao qual a leitura do acelerômetro impõe o sistema, porém com a filtragem complementar o valor obtido pelo giroscópio consegue amenizar a falha e prover um resultado mais acurado.

Para solucionar o problema do *bias*, apresentado em ambas simulações, faz-se necessária a utilização de filtros de segunda ordem, que são mais complexos, porém compensariam o *bias* gerado pelo acelerômetro, zerando o erro estacionário.

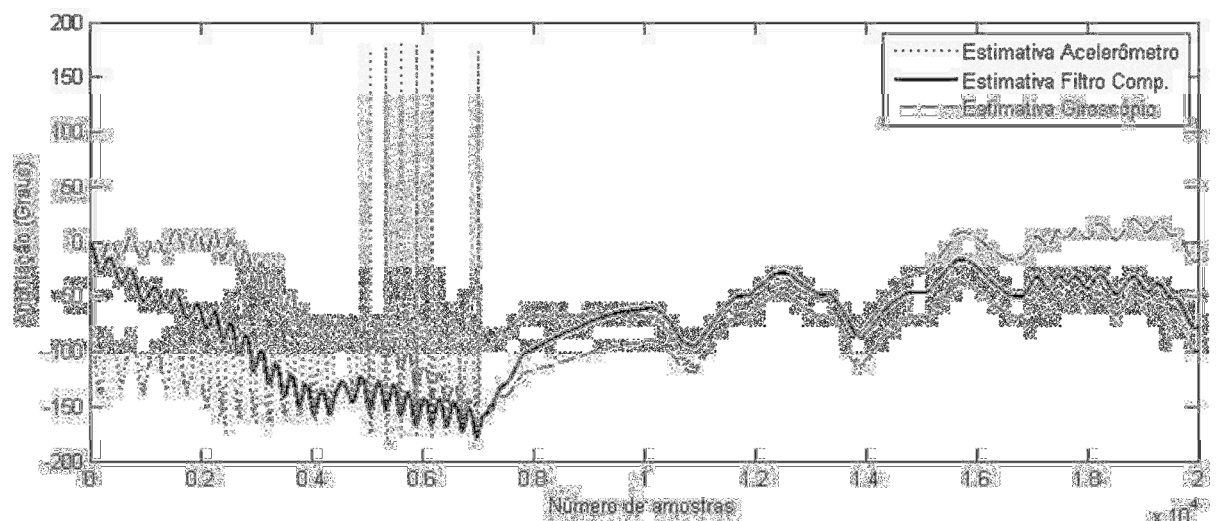


Figura 5. Simulação com aplicação de aceleração.

Conclusões

Através da filtragem complementar foi possível obter dados de angulação interessantes: a filtragem tratou da maioria dos problemas de cada sensor utilizado, como os *bias* e irregularidades. Uma melhor alternativa a este tipo de filtro é apenas o filtro de Kalman, porém normalmente em aplicações domésticas ou educacionais é descartado por seu extremamente denso código, entre outros.

Como os dados utilizados foram obtidos experimentalmente de um modelo real, o filtro encontrado pode ser diretamente aplicado em, por exemplo, microcontroladores para uso em projetos de plataformas móveis, como um *DIY Segway*®.

Contudo, com a grande explosão tecnológica que ocorreu, novas placas com IMUs (sensores inerciais) se tornaram mais acessíveis e de fácil manuseio: há até placas que já têm sensores com filtragem por filtro de Kalman de baixo custo. Assim, torna-se cada vez mais difícil encontrar algum estudante que se interesse por esse estudo.

Porém, é uma experiência extremamente válida no âmbito educacional e que deveria ser mostrada com um pouco mais detalhamento em disciplinas de controle de cursos como Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Automação, Engenharia Mecatrônica, entre outros.

Referências Bibliográficas

- Baerveldt, A. ; Klang, R. (1997) A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter. *Intelligent Engineering Systems*. Halmstad.
- Clifford, M.; Gomez, L. (2005) *Measuring Tilt with Low-g Accelerometers*. Tempe, AZ.
- Colton, S. (2007) *The Balance Filter*.
- Euston, M.; Coote, P; Mahony, R.; Jonghyuk, K.; Hamel, T. (2007) “A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV with a low-cost IMU.” *6th Internacional Conference on Field and Service Robotics*.
- Madgwick, S. O. H.; Vaidyanathan, R.; Harrison, A. J. L. (2010) *An Efficient Orientation Filter for IMU and MARG Sensor Arrays*. Department of Mechanical Engineering, University of Bristol.
- Tuck, K. (2007) *Tilt Sensing Using Linear Accelerometers*. Tempe, Az.