



Fusão de Informação em Análise de Dados

Ficha Prática nº 2

Objetivo: Pretende-se exemplificar a aplicação da fusão de dados de sensores para obter a estimativa da atitude de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

1. Introdução

Uma parte importante do controlo de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) é ter disponíveis os estados corretos do sistema para feedback no sistema de controlo do VANT. No entanto, os sensores usados em VANTs, como giroscópios e acelerómetros (geralmente integrados numa Unidade de Medição Inercial (UMI)), apresentam frequentemente vários problemas:

- Os giroscópios medem a taxa angular de variação da posição e não a posição angular diretamente;
- Os acelerómetros medem mais do que apenas a aceleração linear, como, por exemplo, a aceleração gravitacional e termos da força inercial de Coriolis;
- As medições apresentam ruído e são enviesadas;
- Os estados da estrutura do sistema necessitam de ser transformados para a estrutura de referência inercial (por exemplo, ângulos de Euler).

Neste contexto, pretende-se desenvolver um método para determinar com precisão a atitude (orientação) dos VANTs (excluindo a guinada (*yaw*) – rotação em torno do eixo vertical, uma vez que isso requer um magnetómetro adicional) puramente a partir dos dados do acelerómetro e do giroscópio.

2. Enquadramento

Antes de entrar no desenvolvimento dos algoritmos para estimativa da atitude, convém definir a notação e alguns conceitos básicos sobre os sensores.

2.1 Notação

Nesta ficha será considerada a seguinte notação:

- A_x, A_y, A_z - Medidas em bruto de aceleração ao longo de cada eixo (m/s^2);
- G_x, G_y, G_z - Medidas em bruto do giroscópio em torno de cada eixo ($^{graus}/s$), geralmente referidas como p, q e r , respetivamente;
- ϕ, θ - ângulo de rotação (*roll angle*, rotação em torno do eixo X, em graus) e ângulo de inclinação (*pitch angle*, rotação em torno do eixo Y, em graus);
- $\hat{\phi}$ - indica uma estimativa do ângulo de rotação em torno do eixo X (*roll angle*);
- $\hat{\theta}$ - indica uma estimativa do ângulo de rotação em torno do eixo Y (*pitch angle*).

2.2 Calibração

Ambos os sensores terão um offset (*bias*), o que significa que em repouso eles não apresentam exatamente zero (embora em teoria deveriam). Isso pode ser mitigado mantendo a UMI em repouso, somando as medições ao longo de um período de tempo e, finalmente, dividindo pelo número total de medições. Este valor final - o offset médio - pode então ser subtraído de todas as leituras futuras para garantir que a medição real esteja próxima de zero quando o sistema estiver em repouso e nivelado.

2.3 Acelerómetro

Quando a UMI está em repouso, o acelerómetro mede apenas a aceleração gravitacional. Portanto, ao expressar as forças usando trigonometria básica, pode-se calcular uma estimativa da inclinação e da rotação, usando os dados em bruto (*raw data*) da seguinte forma:

$$\hat{\phi}_{Acc} = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \frac{180}{\pi}$$
$$\hat{\theta}_{Acc} = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) \frac{180}{\pi}$$

Será conveniente filtrar os dados em bruto do acelerómetro antes de usar estas equações, pois poderá haver ruído aditivo de alta frequência sobreposto ao sinal. Além disso, em movimento, o acelerómetro medirá os termos de aceleração adicionais que deterioram as estimativas dos ângulos de rotação em torno dos eixos X (*roll*) e Y (*pitch*).

A Figura 1 mostra uma estimativa do ângulo de rotação em torno do eixo X (*roll*), usando apenas os dados do acelerómetro, o que mostra a natureza ruidosa e não confiável desses dados.

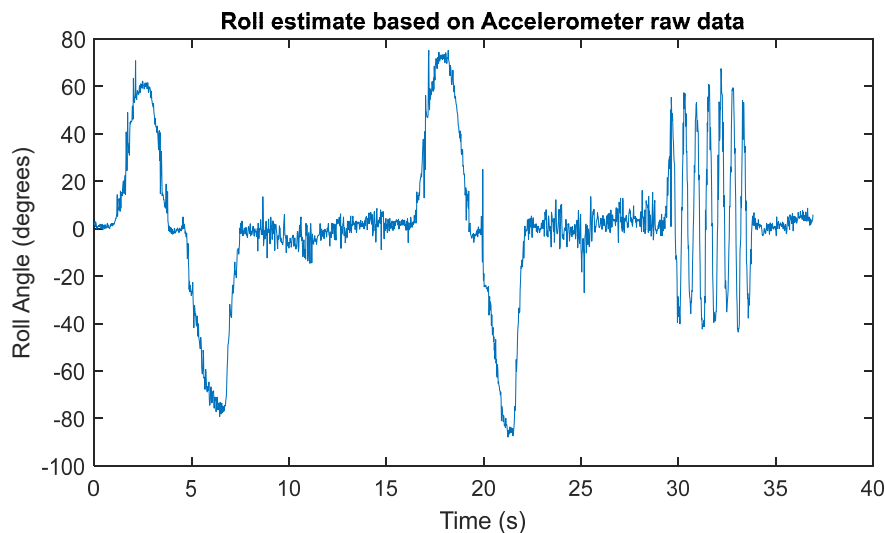


Figura 1. Estimativa do *roll angle* com base nos dados em bruto do acelerómetro.

Aplicando um filtro aos dados em bruto do acelerómetro, usando, por exemplo, um filtro simples de média móvel, obtém-se uma estimativa muito mais “limpa”, conforme se pode observar na Figura 2. No entanto, a amplitude do movimento de alta frequência, de $t = 30\text{s}$ a $t = 35\text{s}$, é atenuada pelo filtro passa-baixa. Este resultado não é ideal, pois isso não permite obter o ângulo de rotação correto nas frequências mais altas (estimativa original vai até cerca de 60 graus, enquanto a estimativa filtrada atinge apenas 40 graus). Nestas situações, é sempre necessário procurar um compromisso entre o quão bem podemos ‘limpar’ o nosso sinal e o quanto modificamos a resposta.

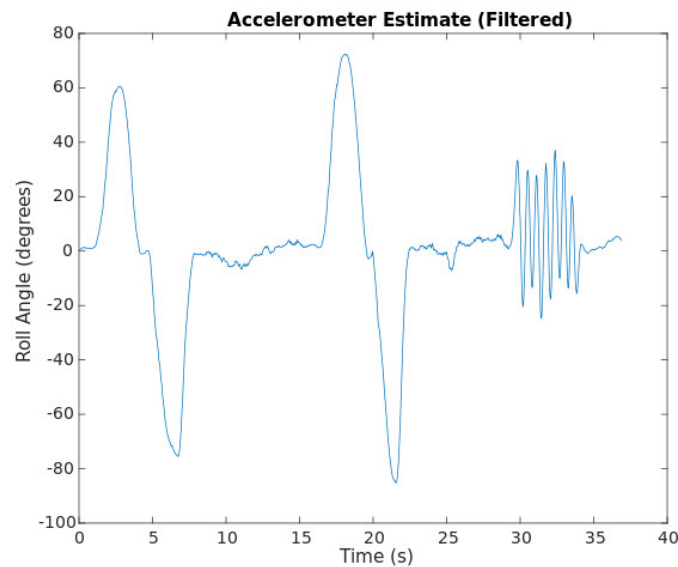


Figura 2. Estimativa do *roll angle* com base nos dados filtrados do acelerómetro.

2.4 Giroscópio

O giroscópio mede taxas angulares de variação da posição em torno de cada eixo, em relação à estrutura do corpo. Assumindo medições sem ruído, poderíamos calcular o integral destas medições em bruto para obter a posição angular em relação à estrutura do corpo.

No entanto, habitualmente, teremos ruído presente nas leituras do giroscópio. Calculando o integral, somaríamos todos os pequenos erros devido ao ruído que, então, se acumulariam ao longo do tempo e se tornariam tendencialmente ilimitados em magnitude. Isto é comumente conhecido como deriva giroscópica.

Mesmo aplicando um filtro passa-baixa ao sinal não ajudará, pois, em primeiro lugar, isso causará um atraso nas medições e, em segundo lugar, apenas atrasará o início do desvio, uma vez que não podemos eliminar completamente o ruído do sinal. De referir que a integração por si só já atua como um filtro passa-baixa.

A Figura 3 mostra uma estimativa do ângulo de rotação adquirido pela integração dos dados do giroscópio ruidoso. O desvio pode ser observado claramente, mesmo após um curto período de tempo. Neste exemplo, considerou-se que o estado efetivo do ângulo *pitch* é expresso por: $\theta_t = e^{-t} \sin(2\pi t)$ e que o ruído é aleatório seguindo uma distribuição normal de média 1 e desvio padrão 0.5.

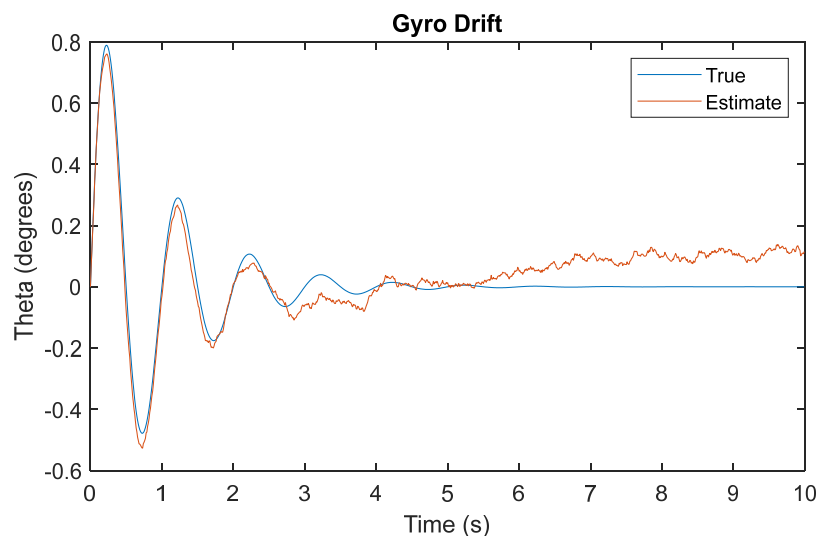


Figura 3. Desvio do giroscópio.

Nota: Como foi mencionado acima, os giroscópios medem taxas angulares de variação na estrutura de um sistema. Por exemplo, imaginando que começamos do repouso e evoluímos para um valor de *pitch* até 45 graus, depois viramos para qualquer um dos lados (*yaw*) girando 90 graus sobre o eixo da estrutura do corpo - isso diminuirá o nosso ângulo de inclinação (*pitch*) na estrutura inercial, simplesmente virando a estrutura do corpo! Portanto, não podemos simplesmente integrar as taxas angulares de variação fornecidas pelo giroscópio para obter os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* no referencial inercial. As taxas de variação dos ângulos de Euler dependem de mais do que uma velocidade angular da estrutura corporal. Para obter as taxas de variação no referencial inercial, é necessário transformar os estados usando a seguinte matriz:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

Podemos, então, integrar esses estados transformados, assumindo ruído zero, para obter a atitude inercial. Esta transformação poderá ser usada nos algoritmos de fusão de sensores.

3. Fusão de dados dos sensores

Conforme referido na seção anterior, os dois sensores disponíveis estão longe de corresponder ao ideal. Os acelerómetros são adequados para quando o sistema não está em movimento e os giroscópios funcionam bem por curtos períodos de tempo. No entanto, para longos períodos de tempo e de forma individual, ambos os sensores não fornecem estimativas confiáveis dos ângulos *pitch* e *roll*.

O princípio que está na base da fusão de dados de sensores, como o próprio nome indica, é combinar os dados obtidos de dois ou mais sensores imperfeitos para obter uma estimativa melhorada e mais confiável do estado do sistema associado a esses sensores.

Exploraremos algumas técnicas de fusão de dados de sensores nesta secção.

3.1 Filtro Complementar

O filtro complementar combina as características de baixa frequência desejáveis do acelerómetro com as características de alta frequência desejáveis do giroscópio. Basicamente, tem-se em conta os aspetos descritos anteriormente, filtrando os resultados e, em seguida, combinando as duas estimativas para fornecer uma única estimativa aperfeiçoada.

O método é o seguinte:

1. Escolha uma constante α , tal que $0 < \alpha < 1$. Quanto maior for o valor de α , mais “confiáveis” são as medições do acelerómetro. Se o valor de α tender para zero, a estimativa será baseada principalmente nas medições do giroscópio. Um bom ponto de partida é $\alpha = 0.1$.
2. Inicializar a estimativa do estado, por exemplo com $\hat{\phi}_{t=0} = 0$.
3. Para cada passo (período de amostragem Δt):
 - a) Obter os valores em bruto (*raw data*) de acelerómetro e giroscópio da UMI.
 - b) Calcular a estimativa do ângulo a partir dos dados do acelerómetro ($\hat{\phi}_{Acc}$) usando a equação da secção 2.3.
 - c) Combinar esta estimativa com o integral dos dados do giroscópio transformado (de acordo com a secção 2.4):

$$\hat{\phi}_{t+1} = (1 - \alpha)(\hat{\phi}_t + \dot{\phi}_G \Delta t) + \alpha \hat{\phi}_{Acc}$$

A etapa final (3c) é uma equação de diferenças que efetua a filtragem. As medições do acelerómetro são filtradas com um filtro passa-baixo, enquanto as medições do giroscópio são filtradas por um filtro passa-alto. Estes sinais são então combinados, dependendo da constante α , para gerar a estimativa do estado final.

O filtro complementar tem várias vantagens. Por exemplo, tem apenas um parâmetro ajustável (α), é fácil de implementar (em poucas linhas de código e sem requer grande poder de processamento) e, também, oferece desempenho satisfatório. Na Figura 4 abaixo, pode-se observar o resultado da aplicação do filtro complementar para dois valores diferentes de α .

Para $\alpha = 0.4$, o filtro complementar depende fortemente dos dados do acelerómetro (que alimentam o filtro complementar sem pré-filtro passa-baixo, uma vez que essa é a função do filtro complementar!) e, portanto, obtém-se um resultado com ruído significativo.

À medida que se reduzir o valor de α para 0.1, o resultado fica mais dependente dos dados do giroscópio. Como se pode observar no gráfico e em comparação com o uso apenas do acelerómetro para a estimativa (ver Figura 2), o movimento de alta frequência é menos atenuado, no entanto, as componentes de ruído são filtradas satisfatoriamente.

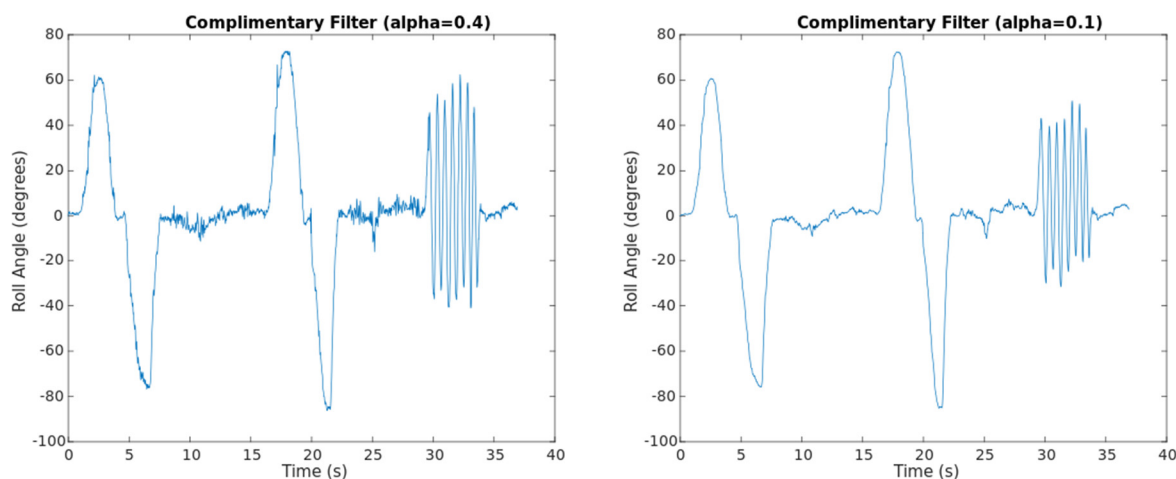


Figura 4. Resultados do filtro complementar com $\alpha = 0.4$ e $\alpha = 0.1$.

4. Exercícios

Considerando o dataset disponibilizado com os dados adquiridos com os sensores de uma UMI (com 6 graus de liberdade), efetue as seguintes tarefas:

1. Ler e representar os dados dos sensores (acelerómetros e giroscópios);
2. Estimar e representar os ângulos *pitch* e *roll* apenas com base nos dados em bruto (*raw data*) dos acelerómetros;
3. Aplicar um filtro passa-baixo (por exemplo um filtro de média móvel) às estimativas anteriores e representar os resultados obtidos, comparando com os não filtrados.
4. Simular a estimativa do ângulo *roll* por integração da variação desse ângulo, obtida a partir dos giroscópios, e representar o resultado comparando com o ângulo *roll* efetivo, sem ruído;
5. Estimar e representar os ângulos *pitch* e *roll* com base na fusão dos dados dos sensores (acelerómetros e giroscópios) usando um filtro complementar (segundo o método indicado anteriormente), fazendo variar o valor do parâmetro α . Discutir os resultados obtidos.