



Análise do Filtro de Kalman Estendido para estimativas de posição translacional e angular

Analysis of the Extended Kalman Filter for translational and angular position estimates

Lucas Vinícius Araujo Miguel¹, Natássya Barlate Floro da Silva²

RESUMO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são veículos capazes de voar sendo pilotados de forma remota ou de forma autônoma, com pouca interação do ser humano, possibilitada pelos sistemas de piloto automático. Um elemento essencial para essa autonomia é a fusão de dados sensoriais, que combina informações de sensores como receptor GPS (*Global Positioning System*), giroscópios e acelerômetros para estimar com precisão a posição, velocidade e orientação das aeronaves. Nesse contexto, destaca-se o uso do Filtro de Kalman Estendido (EKF, do inglês, *Extended Kalman Filter*), uma técnica capaz de lidar com incertezas e não linearidades inerentes a esses modelos, tornando-o fundamental para a obtenção de estimativas confiáveis. O foco principal deste artigo é avaliar a aplicação do EKF na estimativa de posição translacional e angular em sistemas dinâmicos, utilizando dados provenientes de acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, barômetro e receptor GPS. Os experimentos foram conduzidos com o piloto automático Pixhawk 4 e ArduCopter, e os resultados demonstraram a eficácia do EKF na obtenção de estimativas precisas, mesmo em cenários dinâmicos.

PALAVRAS-CHAVE: ArduCopter; Filtro de Kalman Estendido; Pixhawk.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are aircraft capable of flying either remotely piloted or autonomously, with minimal human interaction, made possible by autopilot systems. An essential component enabling this autonomy is sensor data fusion, which combines information from sensors such as GPS (Global Positioning System) receiver, gyroscopes, and accelerometers to accurately estimate the aircraft's position, velocity, and orientation. In this context, the Extended Kalman Filter (EKF) is highlighted as a technique capable of handling uncertainties and nonlinearities inherent in these models, making it crucial for obtaining reliable estimates. The main focus of this article is to assess the application of EKF in translational and angular position estimation in dynamic systems, using data from accelerometers, gyroscopes, magnetometers, barometers, and GPS receiver. Experiments were conducted using the Pixhawk 4 and ArduCopter autopilot system, and the results demonstrated the effectiveness of EKF in obtaining precise estimates, even in dynamic scenarios.

KEYWORDS: ArduCopter; Extended Kalman Filter; Pixhawk

INTRODUÇÃO

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm desempenhado um papel cada vez mais significativo em uma variedade de aplicações, desde a agricultura de precisão até o monitoramento de áreas de difícil acesso. Uma característica essencial dessas aeronaves é a capacidade de operar

¹ Bolsista da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: lucasmiguel@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5341812148968307>.
² Docente do Departamento Acadêmico de Computação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: natassyasilva@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3393376801047734>.



de forma autônoma, graças ao uso de sistemas de piloto automático. Esses sistemas permitem que os VANTs naveguem, mantenham a altitude e controlem sua trajetória sem intervenção humana direta. Para que isso seja possível, é empregada a tarefa de fusão de dados sensoriais, que envolve a combinação e interpretação de informações de múltiplos sensores, como GPS (*Global Positioning System*), giroscópios e acelerômetros, para estimar a posição, a velocidade e a orientação da aeronave de forma precisa e confiável. A principal técnica aplicada nesse cenário é o Filtro de Kalman Estendido (EKF, do inglês, *Extended Kalman Filter*), capaz de lidar com incertezas e não linearidades existentes nestes modelos (VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2015).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação do Filtro de Kalman Estendido para estimativas de posição translacional e angular em sistemas dinâmicos, a partir das medições de acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, barômetro e receptor GPS. A análise foi realizada com o piloto automático Pixhawk 4, com a coleta de dados reais e avaliação da precisão em cenários estáticos e com movimentações angulares.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente para este trabalho seriam usados os sensores de IMU GY-9250/6500 (INVEN-SENSE, 2016), composto por 3 acelerômetros, 3 giroscópios e pelo módulo AK8963 que possui 3 magnetômetros, e o receptor GPS ublox Neo-M8N (U-BLOX, 2021), com a biblioteca *Arduino_AHRS_System*, que possui a implementação do Filtro de Kalman Estendido. Porém, depois de realizada a implementação da leitura dos sensores com a placa de processamento Arduino Mega, foram constatadas inconsistências nas leituras dos sensores. Acredita-se que o motivo dessas inconsistências podem ser sido por problemas nas conexões entre os sensores e a placa de processamento ou por defeitos de hardware nos sensores. Logo, a partir dessa dificuldade, foi necessário alterar o projeto para utilizar o piloto automático Pixhawk 4 para VANTs.

O Pixhawk 4 possui um processador principal 32 bit ARM Cortex M7 216 MHz, um processador para funções de entrada e saída 32 Bit Arm Cortex M3 24 MHz, 2 MB de memória *flash* e 512 KB de memória RAM, já integrado com os seguintes sensores: 3 acelerômetros e 3 giroscópios no módulo ICM-20689, 3 acelerômetros e 3 giroscópios no módulo BMI055, 3 magnetômetros em IST8310 e um barômetro MS5611. Além disso, possui também um receptor GPS ublox Neo-M8N externo conectado ao piloto automático (HOLYBRO, 2019). O *firmware* usado para a leitura dos dados dos sensores e fusão de dados sensoriais com o EKF foi o ArduCopter 4.5.0, um software de código aberto usado para o controle de aeronaves do tipo multirrotores (ARDUPILOT DEV TEAM, 2023).

Para a execução dos experimentos, a Pixhawk 4 e o receptor GPS foram posicionados em uma aeronave *quadrotor* apenas para manter um posicionamento fixo e facilitar a execução do processo de calibração, como pode ser visto na Figura 1. Porém, em nenhum momento os motores da aeronave foram acionados, evitando a interferência nos magnetômetros.

A versão usada do EKF para este trabalho foi a versão EKF3 do projeto do ArduCopter, que avalia a qualidade dos dados de múltiplas combinações de sensores para decidir as melhores estimativas. Cada combinação utiliza um EKF com 24 estados, que são representados no Sistema de Coordenadas do Corpo (SCC) ou no Sistema de Coordenadas Inercial NED (*North-East-Down*):



Figura 1 – Pixhawk 4 e receptor GPS Neo-M8N fixados em um *quadrotor* para os experimentos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

vetores do erro de rotação no SCC $[rot_X, rot_Y, rot_Z]$ para atualização da atitude representada por quaternions, velocidades no NED $[v_N, v_E, v_D]$, posições no NED $[p_N, p_E, p_D]$, erro de deslocamento (*bias offset*) dos giroscópios no SCC $[\Delta g_X, \Delta g_Y, \Delta g_Z]$, erro de escala (*scale factor*) dos giroscópios $[Sg_X, Sg_Y, Sg_Z]$, erro de deslocamento do acelerômetro no eixo Z do SCC Δa_Z , vetor do campo magnético da Terra no NED $[M_N, M_E, M_D]$, vetor do campo magnético do corpo em SCC $[Mc_X, Mc_Y, Mc_Z]$ e o vetor do vento transversal em NE $[W_N, W_E]$.

Na fase de predição do EKF, o estado é atualizado com as leituras dos acelerômetros e giroscópios por meio da integração de acelerações e velocidades, além da subtração do vetor da gravidade rotacionado para SCC e também é calculada a matriz de covariância do estado. Esses cálculos se repetem sempre que novas leituras estão disponíveis. Posteriormente, na fase de atualização, o estado é corrigido pelas medições dos magnetômetros, barômetro e do GPS. Essas medidas são subtraídas dos estados preditos e essa diferença é chamada de inovação. A inovação é multiplicada pelos ganhos do filtro, obtidos a partir dos jacobianos das matrizes do sistema e da matriz de covariância do estado, oferecendo uma correção a cada estado. Dessa forma, os valores obtidos são mais precisos do que valores obtidos apenas por um dos sensores, tornando as estimativas mais robustas na presença de dados ruidosos dos sensores (KIM, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro experimento foi realizado com a aeronave totalmente parada no local com coordenadas globais de latitude -23,328952, longitude -51,160549 e altitude 558 m, em relação ao nível do mar. Em relação a sua posição angular, foi mantida com ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* próximos a 0°. Os valores foram ajustados manualmente por meio do software de estação de controle *Mission Planner*, que coleta as informações do ArduCopter em tempo real. Porém, os dados dos experimentos foram salvos diretamente pelo piloto automático a partir da fusão de dados sensoriais com o EKF, salvos como um *Dataflash logs*, lidos posteriormente na ferramenta *MavExplorer*.

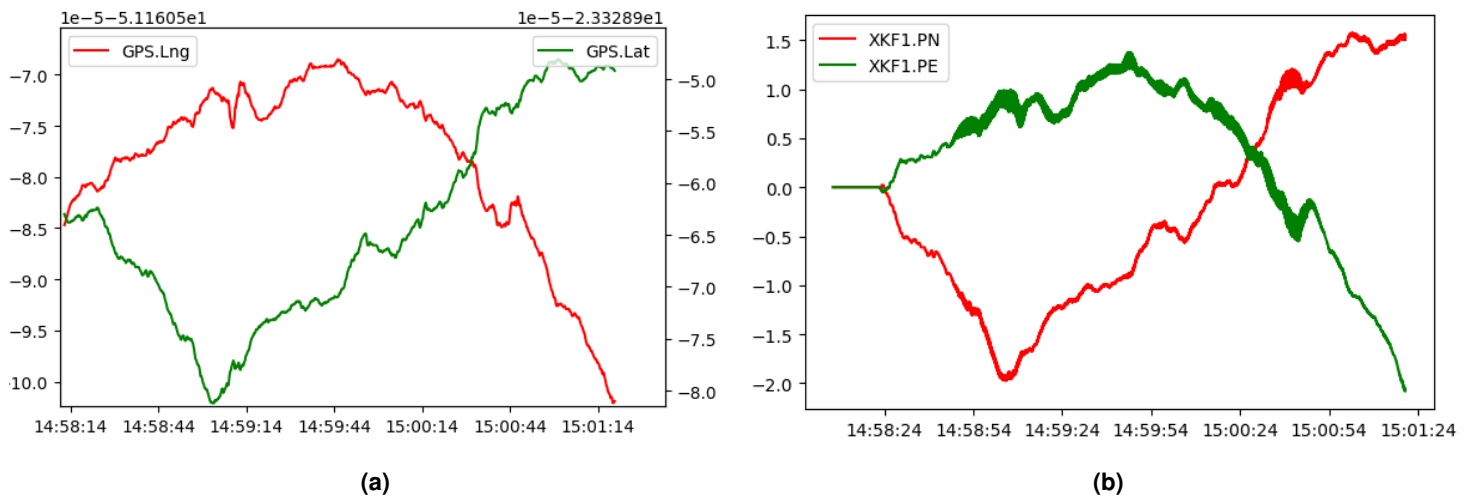
O *Mission Planner* também foi utilizado para o processo de calibração dos acelerômetros



e do magnetômetro, nesse processo, foi necessário colocar a aeronave em diferentes posições e mantido parado. Posteriormente, principalmente por conta do magnetômetro, foi realizada a calibração rotacionando a aeronave em todos os eixos de rotação do SCC (ARDUPILOT DEV TEAM, 2023). Todos os experimentos foram realizados apenas depois desse processo finalizado.

A Figura 2 apresenta os valores das medições de posição de latitude e longitude obtidos apenas pela leitura do GPS e os valores das estimativas de posição p_N e p_E calculadas pelo EKF para o primeiro experimento.

Figura 2 – Posições translacionais: (a) Latitude e longitude medidas pelo GPS (b) p_N e p_E estimadas pelo EKF.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 3 apresenta os valores das medições de posição de altitude obtidos apenas pela leitura do GPS e os valores das estimativas de posição p_D calculadas pelo EKF para o primeiro experimento. Nesse caso, o valor de p_D é proporcional ao contrário da altitude, já que o eixo *Down* aponta para baixo, em direção à Terra. É possível observar que os valores possuem um comportamento similar, demonstrando que são corretamente corrigidos pelo GPS, mas com uma frequência maior e sendo mais suscetíveis às variações dos acelerômetros, mas ainda se mantendo dentro de intervalos finitos, o que não aconteceria apenas com a integração dos valores resultantes dos acelerômetros.

A Figura 4 apresenta os valores dos ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* estimados pelo EKF para o primeiro experimento. Os valores do *roll* e do *pitch* estão claramente próximos de 0° como esperado. Porém, os valores de *yaw* variam entre 355° e 359° , mas que também estão corretos, devido à descontinuidade que existe nas medições dos ângulos de Euler entre 360° e 0° . Sendo assim, os valores de *yaw* também são próximos a 0° , demonstrando o correto funcionamento do EKF para a estimativa da atitude, já que apenas com a integração da velocidade angular disponibilizada pelos giroscópios, esses valores apresentariam erros maiores após alguns segundos, já que a taxa de atualização de dados da IMU é de 400 Hz.

O segundo experimento foi realizado posicionando a aeronave em uma base móvel para a variação do ângulo de *yaw*. A aeronave foi posicionada em 0° , rotacionada e mantida na mesma posição por 30 segundos a cada 15° , até atingir 90° . Os valores de *yaw* resultantes estão apresenta-

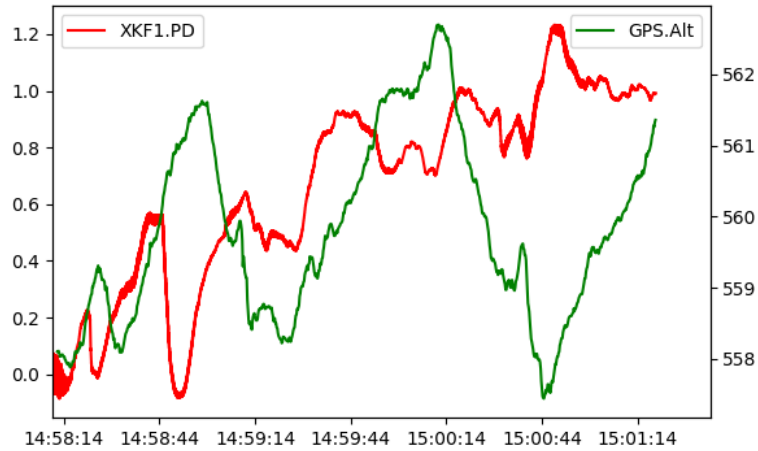


XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR

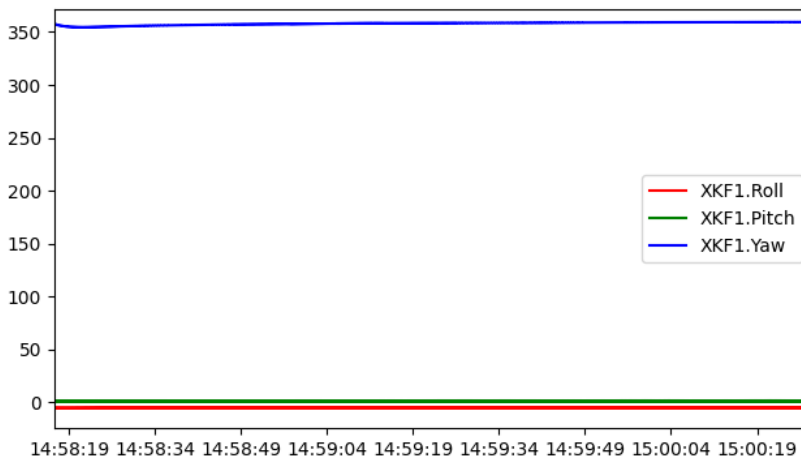


Figura 3 – Posições translacionais de altitude medida pelo GPS e p_D estimada pelo EKF.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4 – Posições angulares dos ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* estimados pelo EKF.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

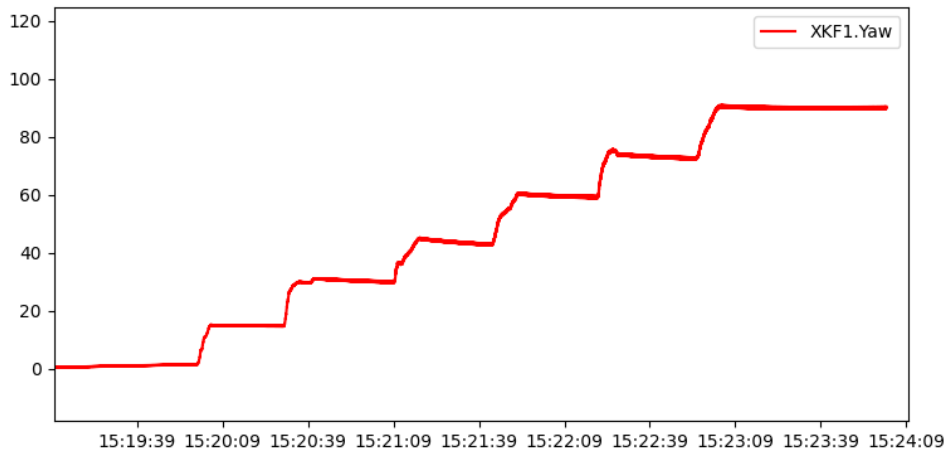
dos na Figura 5, demonstrando que o EKF também oferece boas estimativas diante de cenários em movimento.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados observados a partir dos experimentos, pode-se concluir que o EKF fornece boas estimativas de posição translacional e angular, permitindo aplicações de navegação para veículos autônomos a partir dos dados coletados por acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, barômetro e receptor GPS. Com a fusão sensorial proveniente de diversos sensores, foi possível adquirir estimativas em uma alta frequência, graças às respostas dos acelerômetros e giroscópios, porém com erros limitados graças às correções oferecidas pelos magnetômetros, barômetro e receptor GPS. Como trabalhos futuros, é possível mencionar a execução de experimentos com o voo real, já que o acionamento dos motores pode provocar vibrações que podem influenciar nas medições



Figura 5 – Posições translacionais de altitude medida pelo GPS e p_D estimada pelo EKF.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

realizadas por acelerômetros e giroscópios e o campo magnético gerado pode também influenciar nas medições dos magnetômetros, gerando erros maiores nas estimativas.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio concedido e pelo financiamento do bolsista para a realização desta pesquisa.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- ARDUPILOT DEV TEAM. **ArduPilot Copter**. Tokyo, 2023. Disponível em: <https://ardupilot.org/copter/index.html>. Acesso em: 10 dez. 2022.
- HOLYBRO. **Pixhawk 4 Technical Data Sheet**. USA, 2019.
- INVENSENSE. **MPU-9250: Product Specification**. USA, jun. 2016. Rev. 1.1.
- KIM, Phil. **Kalman Filter for Beginners: With MATLAB Examples**. Korea: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011. ISBN 9781463648350.
- U-BLOX. **NEO-M8: u-blox M8 concurrent GNSS modules**. Suíça, out. 2021. Rev. 11.
- VALAVANIS, Kimon P.; VACHTSEVANOS, George J. **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. USA: Springer Publishing Company, Incorporated, 2015. ISBN 9048197082, 9789048197088.