

Control robusto basado en un observador de un helicóptero ante ráfagas de viento

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional
Maestría en Ciencias en
Sistemas Autónomos de Navegación Aérea y Submarina

Adrián Humberto Martínez Vásquez

Asesores:

Dr. Iván González Hernández

Dr. Sergio Salazar Cruz

12 de Enero 2016



Contenido

- 1 Motivación
 - Estado del arte
- 2 Objetivo
- 3 Modelo dinámico
- 4 Observador Robusto Lineal
 - Modelo en Espacio de Estado
 - Observador Lineal
- 5 Resultados de simulación
- 6 Resultados experimentales
- 7 Conclusiones
- 8 Trabajo futuro
- 9 Publicaciones
- 10 Bibliografía



Motivación

El uso de vehículos aéreos miniatura (MAVs) en nuestros días, representa un fuente de investigación para el desarrollo de aplicaciones comerciales, civiles y militares. Estas aplicaciones en mucho de los casos necesitan de ser usadas en interiores y exteriores, los (MAVs) están sometidos a condiciones ambientales, en particular a perturbaciones ocasionadas por ráfagas de viento.



- Steven L. Waslander, “Wind Disturbance Estimation and Rejection for Quadrotor Position Control”, University of Waterloo Canada, Seattle Washington 2009.
- Arain, B., Kendoul, F. “Real-time wind speed estimation and compensation for improved flight”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume:50, Issue: 2)
- J. Escareno, S. Salazar, H. Romero, R. Lozano, “Trajectory Control of a Quadrotor Subject to 2D Wind Disturbances”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, April 2013.

Objetivo

Diseñar e implementar en tiempo real un control robusto para estimar perturbaciones dadas por ráfagas de viento y compensarlas durante el vuelo de un helicóptero multi-rotor.



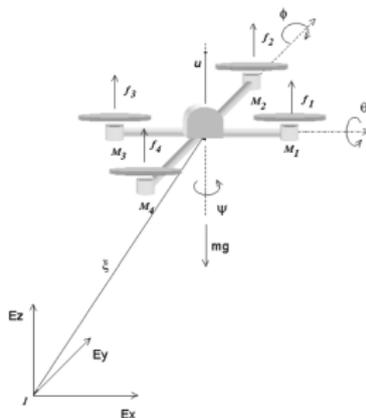
Modelo dinámico

Formalismo Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \mathbf{F} \quad (1)$$

donde $q = (x, y, z, \psi, \theta, \phi) \in \mathbb{R}^6 = (\xi, \eta)^T$, $\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_\xi \\ \tau \end{pmatrix}$

y $L = \mathcal{K} - \mathcal{U}$



Modelo dinámico

Modelo reducido

El modelo dinámico reducido del Cuadrirrotor está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}m\ddot{x} &= -u\sin\theta \\m\ddot{y} &= u\cos\theta\sin\phi \\m\ddot{z} &= u\cos\theta\cos\phi - mg\end{aligned}\tag{2}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\phi} &= \tilde{\tau}_\phi + v(t) \\ \ddot{\theta} &= \tilde{\tau}_\theta + v(t) \\ \ddot{\psi} &= \tilde{\tau}_\psi + v(t)\end{aligned}\tag{3}$$

donde $v(t)$ es la perturbación del viento.



Tomando la dinámica en pitch:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \tilde{\tau}_\theta + v(t) \end{cases} \quad (4)$$

y escribiendo la expresión anterior:

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = A\zeta(t) + Bu(t) + \hat{v} \\ y(t) = h\zeta(t) \end{cases} \quad (5)$$

donde $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\hat{v} = Dv(t)$, $D = [0 \ 1]^T$, $\zeta = [x_1 \ x_2]^T$ y $h = [1 \ 1]$.

Se considera un observador lineal de la incertidumbre con acción integral

$$\begin{cases} \dot{\hat{\zeta}}(t) = A\hat{\zeta}(t) + Bu(t) + \hat{v} - k_0 Ce \\ \dot{\hat{v}}(t) = Ke \end{cases} \quad (6)$$

donde $\hat{v} = Dv(t)$ es el vector perturbación estimada, $D = [0 \ 1]^T$,

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\hat{\zeta} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T$, $B = [0 \ 1]^T$ y

$K = [K_1 \ K_2]^T = \Gamma^{-1}P^T$ son las ganancias del estimador de perturbación, $k_0 = [k_1 \ k_2]$ son las ganancias del estimador de estado.

Teorema

Sea el sistema perturbado donde $v(t)$ es la perturbación, es posible estimar dicha perturbación mediante el observador lineal dado anteriormente, considerando un error de estimación de estado será últimamente acotado.

Análisis de Estabilidad

Se propone la siguiente ecuación de error, siendo $\hat{\zeta}$ el estado estimado y ζ el estado medido.

$$e = \hat{\zeta} - \zeta \quad (7)$$

$$\dot{e} = \dot{\hat{\zeta}} - \dot{\zeta} \quad (8)$$

$$\dot{e} = A\hat{\zeta} + Bu + \hat{\mathcal{V}} - k_0Ce - A\zeta - Bu - \mathcal{V} \quad (9)$$

$$\dot{e} = \underbrace{(A - k_0C)}_{A_c} e + \hat{\mathcal{V}} - \mathcal{V}. \quad (10)$$

Se propone una función candidata de Lyapunov

$$V_{ob} = e^T P e + \hat{\mathcal{V}}^T \Gamma \hat{\mathcal{V}} \quad (11)$$

con $P > 0$, $\Gamma > 0$, derivando la expresión anterior se tiene

$$\dot{V}_{ob} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + \dot{\hat{\mathcal{V}}}^T \Gamma \hat{\mathcal{V}} + \hat{\mathcal{V}}^T \Gamma \dot{\hat{\mathcal{V}}}$$

Sustituyendo la ecuación de error, y realizando operaciones algebraicas se tiene

$$\dot{V}_{ob} \leq -\alpha_2 \|e\| \cdot \left[\|e\| - \frac{2\alpha_4}{\alpha_2} \right] \quad (13)$$

donde $\alpha_1 = \|P\| \cdot \|\Gamma^{-1}\| \cdot \|P^T\|$, $\alpha_2 = \lambda_{\max} Q + 2\alpha_1$,
 $-Q = A_c^T P + P^T A_c$, $\alpha_3 = \|P\|$, $\alpha_4 = \alpha_3 \cdot k_2$, $\|\tilde{y}\| \leq k_2$.

Se concluye que: para $\forall \alpha_2 > 2\alpha_4$ el sistema estará dentro de una esfera $B\{e\} = \{\|e\| \leq \frac{2\alpha_4}{\alpha_2}\}$ por lo que se dice que es sistema es estable.

Resultados de simulación

Modelo de ráfagas de viento

Modelo de ráfagas de viento de Dryden se define como:

$$v_w(t) = v_w^0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(\Omega_i t + \varphi_i) \quad (14)$$

donde

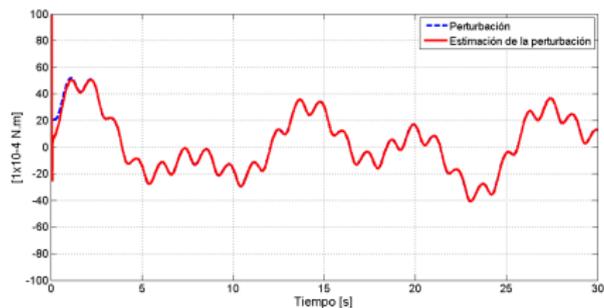
$$v_w(z) = \frac{1}{k} v_w^* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (15)$$

z es la altura del Cuadrirrotor respecto de la superficie de la tierra, z_0 es una constante de rugosidad, k es la constante de von Kármán, v_w^* es la velocidad de fricción respecto de la superficie de la tierra y $v_w(z)$ es la velocidad del viento a una altura z .

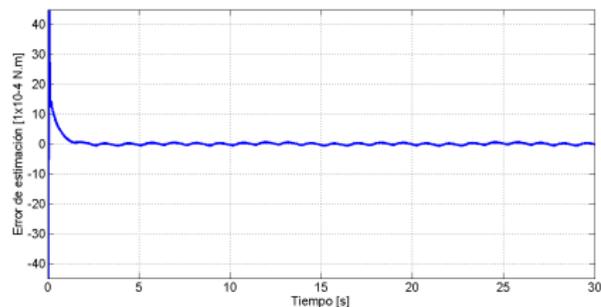


Resultados de simulación

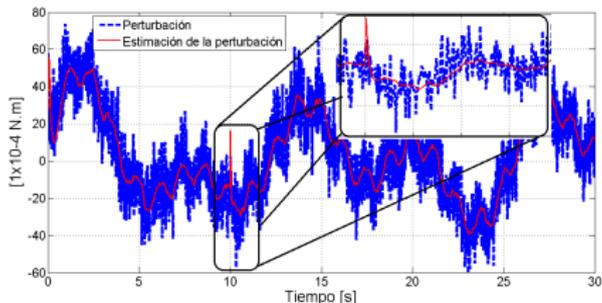
Estimación de la perturbación $k_0 = [50 \ 50]^T$ y $K = [200 \ 200]^T$.



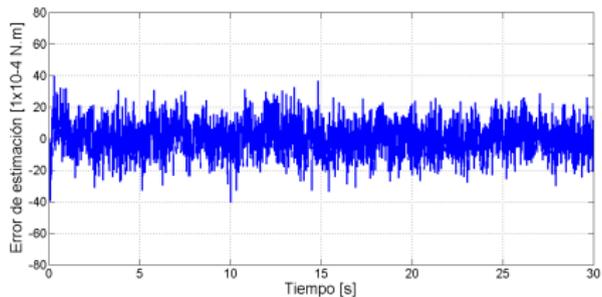
Error de estimación.



Estimación de la perturbación $k_0 = [100 \ 100]^T$ y $K = [300 \ 300]^T$.



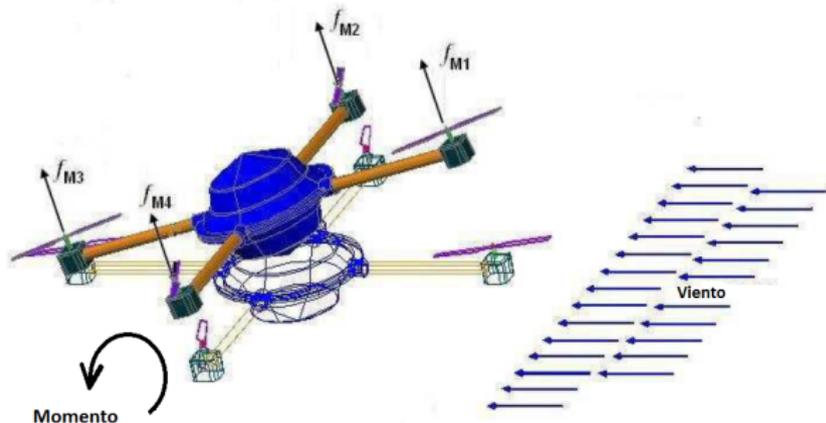
Error de estimación.



Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento

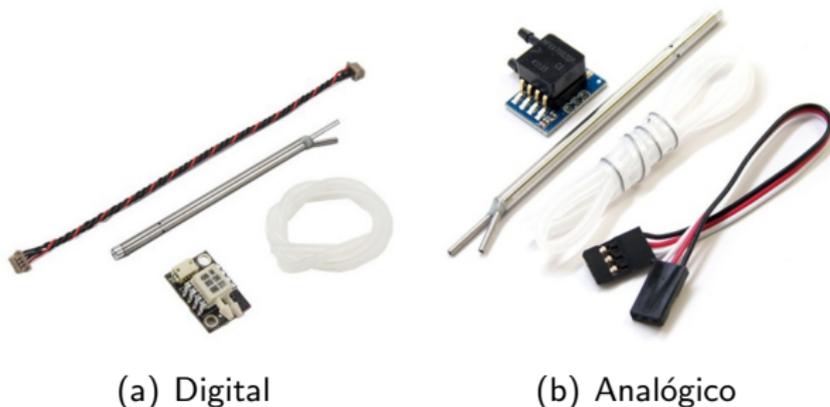
Comportamiento del Cuadrirotor ante ráfagas de viento.



Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento

Sensores para medir el flujo de viento ¹



(a) Digital

(b) Analógico

Figura: Tubo de Pitot

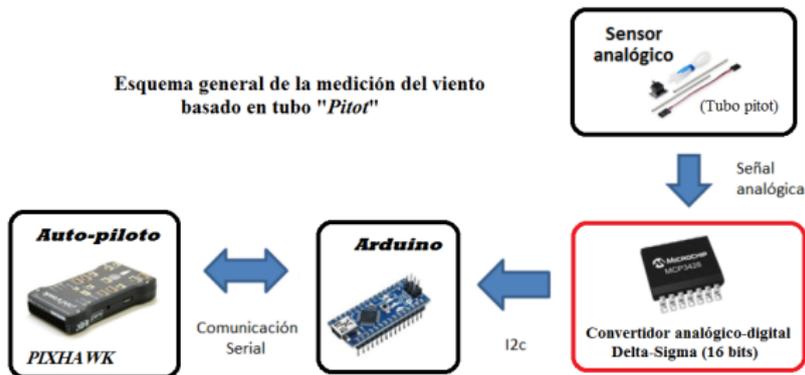
¹Arain, B., Kendoul, F. "Real-time wind speed estimation and compensation for improved flight", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume:50, Issue: 2), April 2014.



Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento

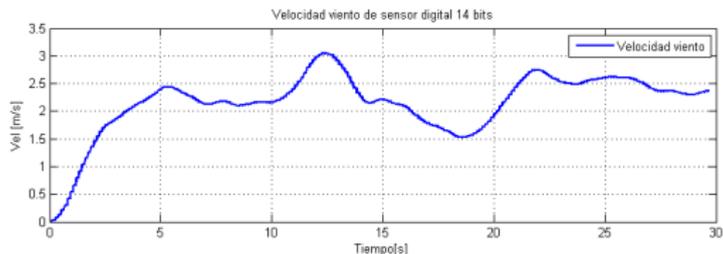
Acondicionamiento del sensor analógico.



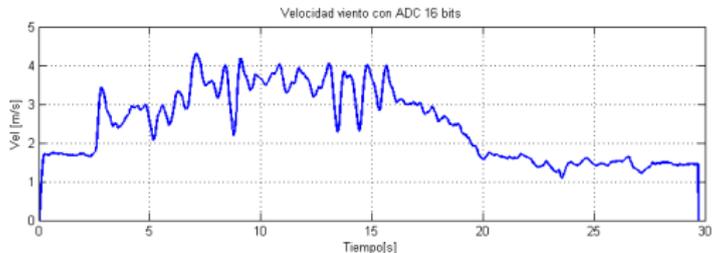
Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento

Medición de viento con los tubos de Pitot analógico y digital. El anemómetro digital registró velocidades de 4 m/s aproximadamente.



(a) Digital

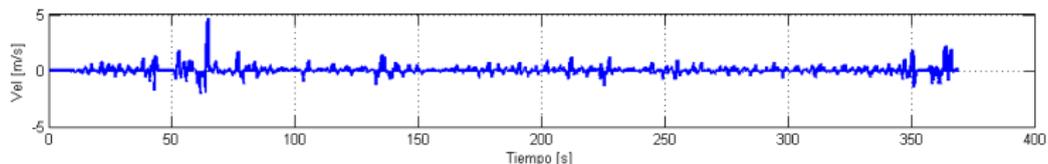


(b) Analógico

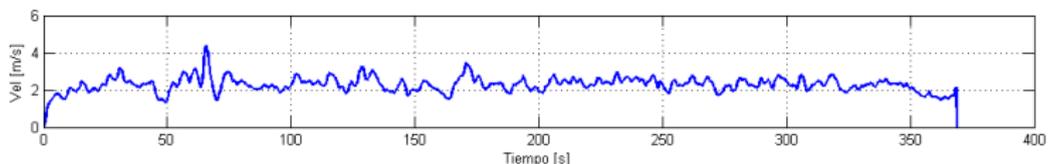
Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento

Resultados en tiempo real de los tubos de Pitot en un vuelo en exteriores.



(a) Velocidad GPS



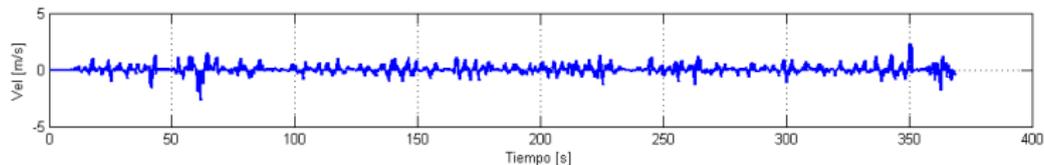
(b) Velocidad viento

Figura: Medición de velocidad de viento en x

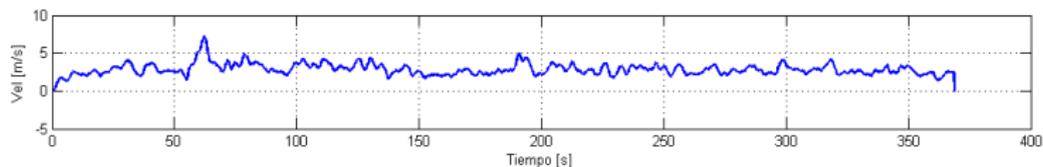


Resultados experimentales

Medición de ráfagas de viento



(a) Velocidad GPS

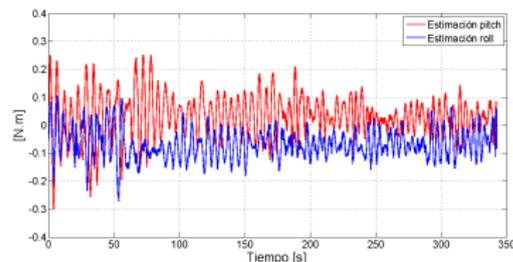
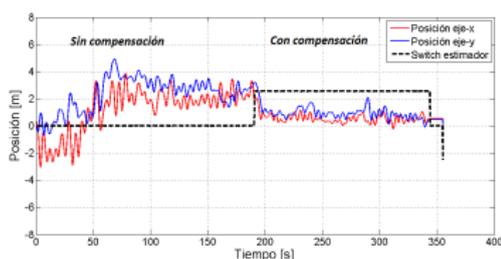


(b) Velocidad viento

Figura: Medición de velocidad de viento en y



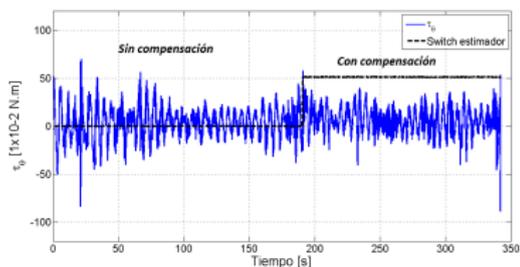
Posición del Cuadrirrotor con y sin compensación



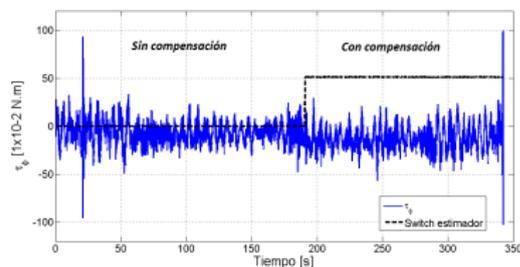
- (a) Posición con y sin compensación de la incertidumbre
- (b) Estimación de la perturbación en pitch y roll ($\hat{v}(t)$)

Figura: Posición en x-y y estimación de la incertidumbre.

Control de orientación.



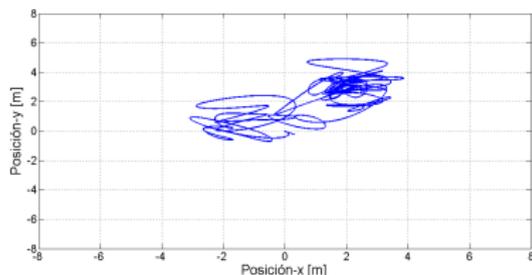
(a) Control de orientación en pitch



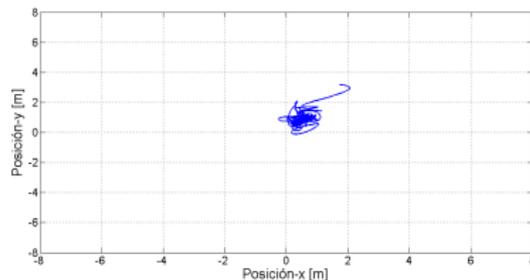
(b) Control de orientación en roll

Figura: Control de orientación

Control de orientación.



(a) Posición sin compensación



(b) Posición con compensación

Figura: Posición en el plano x, y .

- Se implemento un control robusto en tiempo real para estimar y compensar perturbaciones en ambientes exteriores (ráfagas de viento).
- El helicóptero soporta ráfagas de viento de 10 m/s.
- No es recomendable medir ráfagas de viento en un helicóptero utilizando tubos de Pitot, debido a los diferentes ángulos de ataque del viento.
- La posición en altura es afectada por el viento.
- Comparación con la primera técnica utilizada (Sliding mode).

- Implementar el algoritmo de estimación para hacer seguimiento de trayectorias.
- Estudiar otras técnicas de observación robustas.
- Mejorar la posición en altura mediante fusión de datos con el barómetro o mejor aún con un láser.
- Diseñar un observador para la altura.
- Mejorar la posición en x - y mediante un GPS diferencial.



- Adrián Martínez-Vásquez, A. Rodríguez-Mata, Iván Gonzalez-Hernández, Sergio Salazar, Alejandro Montiel-Varela and Rogelio Lozano " *Linear Observer for Estimating Wind Gust in UAV's*", 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2015).
- A. Rodríguez-Mata, R. López, A. Martínez-Vásquez, S. Salazar, A.R. Lozano " *A robust control with disturbance observer for UAV translational tracking*", International Workshop on Research, Education and Development on Unmanned Aerial Systems, RED-UAS 2015.



J. Escareno, S. Salazar, H. Romero, R. Lozano, "Trajectory Control of a Quadrotor Subject to 2D Wind Disturbances", Journal of Intelligent and Robotic Systems, April 2013.

A.Ratnoo,P.B.Sujit and M. Kothari, " Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights", in 18th IFAC World Congress , Milano, Italy, Septemeber 2th, 2011.

Hancer, C.; Oner, K.T.; Sirimoglu, E.; Cetinsoy, E.; Unel, M.; "Straight-line Path Following in Windy Conditions", 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, Atlanta, Georgia, 15-17 Dec. 2010.

Nitin Sydney, Brendam Smyth, Derek A. Paley, " Dynamic control of autonomous quadrotor flight in an estimated wind field", Decision and Control (CDC),2013, IEEE.



Yuri Shtessel. "Sliding Mode Control and observation". Springer, New York, 2010.

Steven L. Waslander; "Wind Disturbance Estimation and Rejection for Quadrotor Position Control", University of Waterloo Canada, Seattle Washington 2009.

Etele, J., "Overview of Wind Gust Modelling with Application to Autonomous Low-Level UAV Control," Tech. rep., Defence Research and Development Canada - Ottawa, November 2006.

Military Specification, "Flying Qualities of Piloted Airplanes," Tech. Rep. U.S. Military Specification MIL-F-8785C.



Arain, B., Kendoul, F. "Real-time wind speed estimation and compensation for improved flight", Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on (Volume:50 , Issue: 2)

Am Cho, Jihoon Kim, Sanghyo Lee, Changdon Kee, "Wind estimation and airspeed calibration using a uav with a single-antenna gps receiver and pitot tube", Aerospace and Electronic Systems, 2011.



Adrián Martínez-Vásquez, A. Rodríguez-Mata, Iván Gonzalez-Hernández, Sergio Salazar, Alejandro Montiel-Varela and Rogelio Lozano " *Linear Observer for Estimating Wind Gust in UAV's*" 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2015).

Military Specification. Flying qualities of piloted airplanes. Tech. Rep. U.S. Military Specification MIL-F-8785C.

air2 Overview of wind gust modelling with application to autonomous low-level uav control. Defence Research and Development Canada - Ottawa, 2006.