

Trabajo de Fin de Master

Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Posicionamiento de un UAV Mediante los
Marcadores Visuales *Aruco* y el Estimador
de Estados de *PX4*

Autor: Isidro Jesús Arias Sánchez

Tutor: Manuel Vargas Villanueva

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Master
Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Posicionamiento de un UAV Mediante los Marcadores Visuales Aruco y el Estimador de Estados de *PX4*

Autor:
Isidro Jesús Arias Sánchez

Tutor:
Manuel Vargas Villanueva
Profesor Titular

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Master: Posicionamiento de un UAV Mediante los Marcadores Visuales Aruco y el Estimador de Estados de *PX4*

Autor: Isidro Jesús Arias Sánchez
Tutor: Manuel Vargas Villanueva

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi abuela Mercedes

Resumen

En este trabajo se busca conseguir el posicionamiento preciso de un quadrotor intentando no usar componentes demasiado costosos. Para ello, se han usado unos marcadores impresos y se ha dotado al vehículo de una cámara. Del proceso seguido hasta conseguirlo, se detallará tanto su programación como los componentes físicos elegidos.

Por otra parte, se analiza una de las mejoras a un estimador de estados convencional que se le aplican en la práctica, tomando como ejemplo el autopiloto de código abierto *PX4*. Una mejora que resuelve la duda de cómo afrontar el retraso que tienen algunos sensores, que se considera nulo en muchos estudios, pero que pueden impactar negativamente en el desempeño si no se tratan adecuadamente. Para demostrar esta idea, se elabora una simulación que pone de manifiesto su utilidad.

Abstract

The aim of this work is to achieve the precise positioning of a quadrotor attempting not to use expensive components. To that end, printed markers has been used and the vehicle has been provided with a camera. Both programming and the chosen physical components will be detailed.

Moreover, it is analyzed an improvement over standard state estimators, that is carried out in practice, specifically in the open source autopilot *PX4*. This enhancement handle the delay that some sensors have, which is not considered in many studies, but they could have a negative impact in the performance if they are not faced appropriately. This idea is tested in a simulation that illustrate his usefulness.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Notación</i>	IX
<i>Acrónimos</i>	XI
1 Introducción	1
2 Estimador de estados	3
2.1 Manejo de medidas retrasadas	3
2.1.1 Detalles de implementación	5
2.2 Modelo bidimensional de un quadrotor para el EKF	6
2.3 Simulación del quadrotor y del estimador	8
2.3.1 Resultados	9
3 Posicionamiento mediante marcadores visuales	13
3.1 Componentes	13
3.2 Programa ejecutado en el ordenador embebido	15
3.3 Detección de marcadores Aruco	18
3.4 Metodología de la experimentación	20
3.4.1 Iteración de los parámetros	21
3.4.2 Registro de resultados (<i>logging</i>)	21
3.5 Resultados experimentales	22
4 Conclusiones	27
5 Trabajos futuros	29
Apéndice A Simulador del estimador de estados	31
Apéndice B Detector de marcadores visuales	41
B.1 main.cpp	41
B.2 vision_params.yml	43
B.3 marker_vision.h	44
B.4 mavlink_helper.h	51
<i>Índice de Figuras</i>	55
<i>Índice de Códigos</i>	57
<i>Bibliografía</i>	59

Notación

P	Posición del vehículo en ejes inerciales
V	Velocidad del vehículo en ejes inerciales
T	Empuje aplicado en ejes cuerpo
T_{rot}	Empuje aplicado en ejes inerciales
θ	Inclinación del quadrotor
τ	Par aplicado al quadrotor
ω	Medida del giróscopo
a	Medida del acelerómetro
$R^{UAV \rightarrow Marcador}$	Orientación del marcador vista desde el vehículo
X	Vector de estados

Acrónimos

<i>UAV</i>	Vehículo aéreo no tripulado
<i>GCS</i>	Estación de control terrestre
<i>NED</i>	Ejes norte, este y abajo
<i>GNSS</i>	Sistema Global de Navegación por Satélite
<i>EKF</i>	Filtro de Kalman extendido

1 Introducción

Actualmente, los vehículos autónomos no están al alcance de cualquiera. Estos no deben de confundirse con los vehículos no tripulados, como los UAVs (Vehículos aéreos no tripulados) que si están más extendidos, llegando a utilizarse para el ocio o en negocios, estando al alcance del bolsillo de cada vez más gente. La mayoría tienen una autonomía parcial y necesitan la supervisión de un piloto en algunas de las fases del vuelo, por ejemplo, en el aterrizaje o cuando se navega cerca de obstáculos. Además, muchos de ellos solo pueden volar en exteriores donde le llega la señal de los satélites. La causa de todas estas limitaciones está en que no pueden determinar dónde están ubicados con exactitud, ya que la precisión que suelen tener es de varios metros. Si se mejorase ese aspecto, el número de aplicaciones en las que se podría utilizar sería enorme. Para empezar, todas las tareas que se realizan actualmente con un piloto, como el traslado urgente de muestras para detectar el coronavirus [1] o la detección mediante cámaras térmicas de koalas que están heridos por los incendios [2].

El interés en realizar estas tareas de forma autónoma no solo está en que cualquiera pueda hacer uso del vehículo, sin necesitar licencia ni habilidades especiales, sino que también hace el sistema más escalable. Si se quisiera, por ejemplo, instalar un sistema de reparto de paquetes mediante vehículos aéreos, y su flota se hace cada vez más grande, llegará un momento que sea difícil que todos los pilotos se pongan de acuerdo compartiendo el mismo espacio aéreo. Si esta planificación la hace en su lugar un ordenador, posiblemente los vuelos estarán más organizados y se pueda operar con más vehículos a la vez. Como última ventaja de la automatización se podría decir que el vehículo podría estar **disponible de forma inmediata** en cualquier momento, y no obligaría a los pilotos a estar trabajando en horas de descanso. Aprovechando esta ventaja, se podría utilizar en una aplicación de seguridad, en la que se programe un vuelo periódico para vigilar una propiedad o que buscase un intruso cuando se detecte una alarma. Frente a la opción de tener muchas cámaras instaladas, de esta otra forma se protegería más la privacidad del usuario.

Realmente, si se disponen de los suficientes recursos, ya existe la tecnología para conseguir ese nivel de automatización. Por ejemplo, mediante balizas sonoras, que son usadas en los interiores de fábricas, o si se opera en el exterior, existe la posibilidad de utilizar la *navegación cinética satelital en tiempo real* (RTK). Otra solución que no necesita de instalación en el entorno, son las cámaras o lídars, que con el uso de unos algoritmos llamados SLAM, pueden crear un mapa del entorno y ubicarse en él. El problema de estos es que



Figura 1.1 Estación de carga de *Flytbase*.

o bien sus sensores son caros, o bien tienen una alta carga computacional que obliga a instalar grandes y costosos ordenadores a bordo del vehículo.

Lo que se busca en este trabajo es una **alternativa más barata** que consiga un posicionamiento centimétrico del vehículo. En concreto se ha hecho uso de unos marcadores visuales planos, que contienen figuras que son fácilmente detectables mediante el procesamiento automático de la imagen. Este método tiene mucha menos carga computacional que los anteriores, de hecho, para su procesamiento se usará uno de los ordenadores embebidos más baratos del mercado. Ya están a la venta algunas soluciones que utilizan esta tecnología para el aterrizaje automático. En particular, algunas empresas como *Everdrone* [3] o *Flytbase* (ver figura 1.1) ofrecen estaciones de carga con los mismos marcadores utilizados aquí.

Existen varios artículos en los que ya han utilizado marcadores visuales para mejorar el posicionamiento de un UAV, la mayoría teniendo como objetivo el aterrizaje automático. En [4] se consigue que un quadrotor *Parrot AR.Drone* aterrice sobre un marcador Aruco, incluso cuando se pierde la vista al marcador brevemente, gracias a las medidas de la IMU. En [5] además de la IMU, se utiliza un sensor de flujo óptico para conseguir aterrizar el vehículo. En ninguno de los dos trabajos se utiliza un autopiloto de código abierto, sino que se limitan a utilizar las interfaces de programación que aportan Parrot y DJI respectivamente, para tomar las medidas de los sensores y comandarle una postura de referencia. Además, la falta de detalles de implementación que suele haber en este tipo de artículos, hace que su trabajo sea más difícil de ser replicado por el lector. En este proyecto, lo que se quiere aportar es otro enfoque en el que se hace uso del estimador de estados del autopiloto, el mismo que se utiliza para estimar la orientación y al que le llegan las medidas de la IMU, magnetómetro, barómetro, etc., para obtener una fuente precisa de posición.

En el presente documento, en primer lugar, en el capítulo 2 se hace un estudio de una parte clave para el posicionamiento con marcadores, que es el estimador de estados. Además, se elabora y se muestran los resultados de una simulación en la que se pone a prueba este. En el capítulo 3 se explica cómo se ha implementado un posicionamiento basado en marcadores visuales, mostrando los componentes utilizados y explicando el programa creado. Finalmente, en ese mismo capítulo se enseñan los resultados experimentales a los que se ha llegado.

2 Estimador de estados

En este capítulo se analizará uno de los elementos que se utilizarán en el siguiente, que es el estimador de estados. En concreto se analiza el que incorpora el autopiloto de código abierto PX4, ya que será este el que se utilizará para la implementación. Previamente, en [6] se hizo una explicación parcial de este, pero se dejaron atrás algunos detalles como el manejo de las medidas retrasadas. Aquí se explicará esto y además se realizará una simulación que demuestre la eficacia del algoritmo.

2.1 Manejo de medidas retrasadas

En muchas ocasiones se tienen sensores con unos retrasos muy diferentes entre ellos, por ejemplo una IMU es mucho más rápida que el procesamiento de la imagen de una cámara o el GNSS. PX4 lo soluciona añadiendo más elementos a la estructura original de un estimador de estados. Uno de sus elementos es un *Filtro de Kalman Extendido* (EKF). Este no usa las medidas más nuevas que le llegan, sino que las almacena y utiliza las que llegaron hace un determinado tiempo. Corriendo en paralelo, existe un estimador llamado *Filtro de Salida*, el cual sí que utiliza la última medida del acelerómetro y del giróscopo.

Supongamos que se tiene un sistema que se mueve en el espacio y del que se quiere conocer sus estados, en concreto, su posición, su velocidad y su orientación. Para este objetivo el sistema está dotado de numerosos sensores como son un acelerómetro, un giróscopo, un barómetro, un GNSS o un sensor de flujo óptico. Cada uno de ellos tiene diferentes propiedades en cuanto a retraso, ruido, precisión, etc. Por ejemplo, la medida aportada por el GNSS es la única fuente de posición absoluta, sin embargo, tiene un gran retraso y las medidas que genera, se refieren a la posición que se tenía hace un tiempo (generalmente decenas de milisegundos).

Para explicar un método de cómo afrontar este problema, se va a poner un ejemplo de la ejecución paso a paso del estimador de estados con diferentes sensores. Supongamos que en la primera ejecución del estimador, se toma la primera medida de la IMU (acelerómetro y giróscopo). El EKF todavía no la utiliza, si no que la guarda en su buffer (figura 2.1a). Conforme llegan nuevas medidas, que ocurre cada 5 ms, estas se introducen en la posición de más a la izquierda del buffer y las que ya estaban se van desplazando hacia la derecha, hasta que llegan a la última celda. Las medidas de esta celda situada más a la derecha, son las que son usadas por el EKF. Los estados que este genera y las medidas utilizadas para estimarlos se refieren al *horizonte de tiempo retrasado*. Como se muestra en la figura, el buffer tiene una longitud de 7 celdas, por lo tanto las medidas de la IMU que llegan al EKF siempre serán las que se recogieron hace 30 ms.

Pasan algunos ciclos más hasta que en el instante 60ms llega la primera medida del GPS, pero esta no se coloca en el extremo izquierdo del buffer junto con las medidas más recientes de la IMU, si no que se lleva directamente a la celda número 5 (ver figura 2.1b). En esta también se encuentran las medidas de la IMU tomadas en el instante 35ms, es decir las que fueron tomadas hace 25 ms, que coincide con el retraso que tiene la posición del GPS con respecto a la IMU o lo que es lo mismo, la medida del GPS, corresponde a la posición que tenía el vehículo hace 25 ms. De esta manera se agrupan las medidas que se refieren al mismo instante físico, es decir, el instante en el que llegaron pero **compensándose su retraso**.

De forma paralela se ejecuta el *filtro de salida*, que es otro estimador de estados y para esta explicación se va a suponer que su funcionamiento interno es exactamente igual al del EKF, la única diferencia es que solamente utiliza las medidas de la IMU, en este caso las que se generan más recientemente. Estos estados se refieren al *horizonte de tiempo actual* y son los únicos que se usan para las otras tareas que tenga vehículo, como por ejemplo para alimentar al controlador de orientación, por esta razón se le denomina filtro de salida.

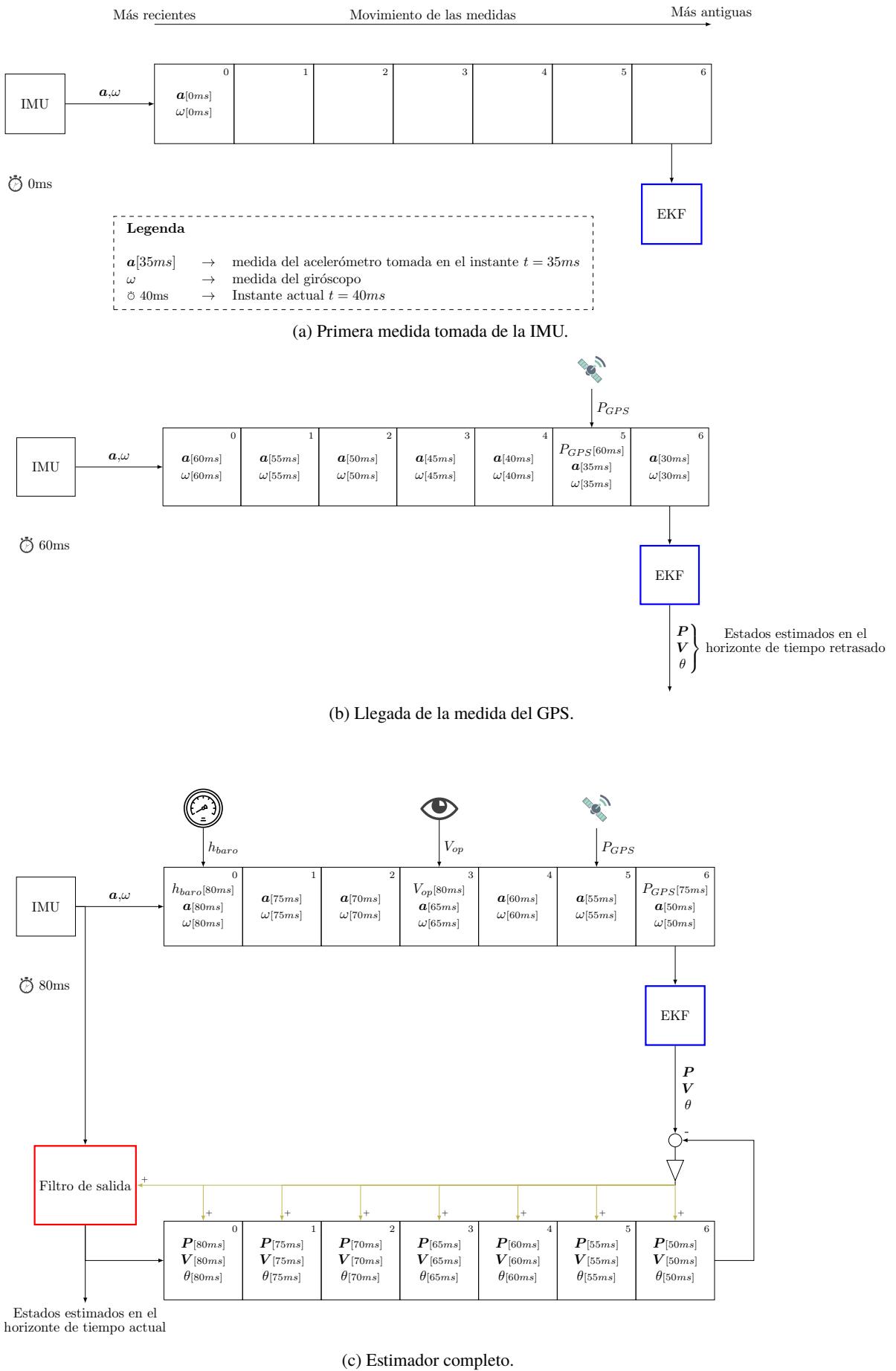


Figura 2.1 Manejo de medidas retrasadas.

El problema que tiene este es que desaprovecha todos los demás sensores que tiene el vehículo, por lo que se le aplica un **mecanismo de corrección**.

Este mecanismo está compuesto otro buffer llamado *buffer de salida*, que se comporta de la misma manera que el primero, pero en lugar de guardar medidas, almacena los estados del filtro de salida. Estos estados se van desplazando hacia la derecha hasta que llegan a la última posición del buffer. En esta posición están los estados que se estimaron por el filtro de salida hace 30 ms, que coincide con el retraso que tienen las medidas del la IMU que entran al EKF. Si al EKF solo se le hubiese suministrado las medidas de la IMU, al igual que al filtro de salida, los estados del EKF y los que hay almacenados en esta última celda del buffer de salida coincidirían. Sin embargo, lo que está ocurriendo es que el EKF recoge medidas de otros sensores y por lo tanto no coincidirán. Para realizar la corrección, se calcula la diferencia entre ellos. Esta diferencia se atenúa y se le suma a todos los elementos del buffer de salida, además de al propio filtro de salida.

En la figura 2.1c se ha ilustrado este mecanismo de corrección además de incluir más medidas: la velocidad proporcionada por flujo óptico (V_{op}), la cual tiene un retraso de 15ms, y la altura que proporciona el barómetro, que se ha supuesto que no tiene ningún retraso.

2.1.1 Detalles de implementación

En este apartado se presentan algunos trozos del código de PX4 que implementan lo anteriormente descrito, además de algunos detalles que se han omitido en el apartado anterior para que fuese más fácil su comprensión.

En el apartado anterior, se explicó que el error entre los estados del EKF y los del filtro de salida se atenúan (multiplicar por una ganancia menor que 1, mostrado en la figura 2.1c como un triángulo) y se le suma a todo el buffer de salida. En el siguiente código se puede comprobar cómo se ha implementado esto. Se puede ver que la corrección de la velocidad y la posición no solo se calcula a partir del error, sino también a partir de la integral del error, por lo tanto aquí se tiene un control proporcional-integral, que tiene como señal de control la corrección al buffer de salida. De esta manera, los estados en el horizonte de tiempo actual, se igualarán a los del horizonte de tiempo retrasado en régimen permanente.

Código 2.1: Corrección del buffer de salida. Ubicado en la línea 488 del archivo *Firmware/src/lib/ecl/EKF/ekf.cpp*

```

488 void Ekf::applyCorrectionToOutputBuffer(float vel_gain, float pos_gain){
489     // calculate velocity and position tracking errors
490     const Vector3f vel_err(_state.vel - _output_sample_delayed.vel);
491     const Vector3f pos_err(_state.pos - _output_sample_delayed.pos);
492
493     _output_tracking_error(1) = vel_err.norm();
494     _output_tracking_error(2) = pos_err.norm();
495
496     // calculate a velocity correction that will be applied to the output state
497     // history
498     _vel_err_integ += vel_err;
499     const Vector3f vel_correction = vel_err * vel_gain + _vel_err_integ *
500     // sq(vel_gain) * 0.1f;
501
502     // calculate a position correction that will be applied to the output state
503     // history
504     _pos_err_integ += pos_err;
505     const Vector3f pos_correction = pos_err * pos_gain + _pos_err_integ *
506     // sq(pos_gain) * 0.1f;
507
508     // loop through the output filter state history and apply the corrections to the
509     // velocity and position states
510     for (uint8_t index = 0; index < _output_buffer.get_length(); index++) {
511         // a constant velocity correction is applied
512         _output_buffer[index].vel += vel_correction;
513
514         // a constant position correction is applied
515         _output_buffer[index].pos += pos_correction;
516     }
517
518     // update output state to corrected values
519     _output_new = _output_buffer.get_newest();
520 }
```

En el código anterior no ha aparecido la corrección de la orientación, y esto es porque requiere que sea tratada a parte. En este estimador, la orientación se expresa en cuaternios y la operación de la corrección no es simplemente una suma como ocurría en el caso de la velocidad, sino que es más complicada y se tardaría demasiado en aplicarla a todos los elementos del buffer. En su lugar, únicamente se aplica una corrección a la orientación estimada en el horizonte de tiempo actual.

Código 2.2: Corrección de la orientación. Ubicado en el archivo [Firmware/src/lib/ecl/EKF/ekf.cpp](#)

En la línea 323 se corrige la orientación:

```
323     // Apply corrections to the delta angle required to track the quaternion states at the
     ↵ EKF fusion time horizon
324     const Vector3f delta_angle(imu.delta_ang - _state.delta_ang_bias * dt_scale_correction
     ↵ + _delta_angle_corr);
```

En la línea 411 se calcula la ganancia del control

```
411     // calculate a gain that provides tight tracking of the estimator attitude states
     ↵ and
412     // adjust for changes in time delay to maintain consistent damping ratio of ~0.7
413     const float time_delay = fmaxf((imu.time_us - _imu_sample_delayed.time_us) * 1e-6f,
     ↵ _dt_imu_avg);
414     const float att_gain = 0.5f * _dt_imu_avg / time_delay;
415
416     // calculate a correction to the delta angle
417     // that will cause the INS to track the EKF quaternions
418     _delta_angle_corr = delta_ang_error * att_gain;
```

Tampoco se ha hablado de la longitud de los buffers, la cual hay que determinar antes de empezar a estimar. En el siguiente código se puede ver cómo se calcula la longitud del buffer de medidas de la IMU. Esta se determina de manera que el EKF se ejecutará con un retraso igual al sensor que más retraso tiene.

Código 2.3: Cálculo del tamaño del buffer. Ubicado en el archivo [Firmware/src/lib/ecl/EKF/estimator_interface.cpp](#)

```
512     // find the maximum time delay the buffers are required to handle
513     const uint16_t max_time_delay_ms = math::max(_params.mag_delay_ms,
514                                                 math::max(_params.range_delay_ms,
515                                                       math::max(_params.gps_delay_ms,
516                                                       math::max(_params.flow_delay_ms,
517                                                       math::max(_params.ev_delay_ms,
518                                                       math::max(_params.auxvel_delay_ms,
519                                                       math::max(_params.min_delay_ms,
520                                                       math::max(_params.airspeed_delay_ms,
521                                                       _params.baro_delay_ms))))));
522
523     // calculate the IMU buffer length required to accomodate the maximum delay with some
     ↵ allowance for jitter
524     _imu_buffer_length = (max_time_delay_ms / FILTER_UPDATE_PERIOD_MS) + 1;
```

2.2 Modelo bidimensional de un quadrotor para el EKF

El objetivo de esta sección, es el de realizar los cálculos necesarios para montar la simulación que vendrá más adelante. Dicha simulación tiene el fin de probar el manejo de medidas retrasadas explicadas anteriormente, no se buscará que sea especialmente realista, añadiendo todos los sensores que se utilizan en la práctica, sino que sea lo más simple posible para centrar la atención en el aspecto que se quiere explicar. Dicho esto, un quadrotor moviéndose en el plano, cuyos únicos sensores son el acelerómetro, giróscopo y GNSS servirá para probar el estimador de estados.

Para realizar el filtro, se tomará prestada la idea de PX4 de suponer que no se tiene conocimiento de ningún aspecto dinámico del vehículo: pares, fuerzas, masa e inercias. En su lugar, se propone un **modelo cinemático** para la fase de predicción del filtro, en el que las entradas son la aceleración lineal y la velocidad angular, que aportan el acelerómetro y giróscopo respectivamente.

Ya que se utilizará un filtro de Kalman discreto, se necesita un modelo discreto en el espacio de estados:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \quad (2.1)$$

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} P_x^{\text{GNSS}} \\ P_y^{\text{GNSS}} \end{bmatrix}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2.2)$$

Siendo \mathbf{X}_k los estados estimados en la iteración anterior, que están compuestos por la posición, velocidad e inclinación estimadas; \mathbf{X}_{k+1} los estados predichos, $\mathbf{u}_k = [a_x \ a_y \ \omega]^T$ el vector de entradas formado por las dos medidas del acelerómetro en los ejes x y y del cuerpo y la medida del giroscopio, $f()$ el modelo de predicción, \mathbf{z}_k el vector de medidas que en este caso solo contiene la posición del GNSS y $h()$ el modelo de observación. Por último, \mathbf{w}_k es el ruido de predicción y \mathbf{v}_k es el de observación, ambos se desarrollarán más adelante.

Para obtener el modelo de predicción, se realiza la integral discreta a la velocidad,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_k \Delta t \quad (2.3)$$

también se hace con la velocidad angular,

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \omega \quad (2.4)$$

y por último se integra la aceleración en ejes iniciales compensando la medida de la aceleración gravitatoria:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_k + \Delta t \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \mathbf{a} + \begin{bmatrix} 0 \\ -g \end{bmatrix} \Delta t \quad (2.5)$$

Viendo este modelo de predicción $f()$ formado por las tres últimas ecuaciones, se puede comprobar que no es lineal con respecto a los estados (debido a las funciones trigonométricas) y por lo tanto no se puede utilizar un filtro de Kalman convencional, sino uno extendido. Este se basa en realizar una aproximación de primer orden del modelo no lineal:

$$\Delta f(\Delta \mathbf{X}_k) \approx \mathbf{F}_k \Delta \mathbf{X}_k \quad (2.6)$$

Siendo F_k el jacobiano del modelo de predicción con respecto a los estados, que para este caso tiene la siguiente expresión:

$$F_k = \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X_{k-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t (-a_x \sin \theta_{k-1} + a_y \cos \theta_{k-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t (-a_x \cos \theta_{k-1} - a_y \sin \theta_{k-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

En cuanto al modelo de observación es bastante más sencillo y lineal en este caso, ya que las medidas corresponden directamente con los estados:

$$h(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Lo último que queda por desarrollar del modelo completo son los ruidos, que se suponen que siguen una distribución normal:

$$\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k) \quad (2.9)$$

$$\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, R_k) \quad (2.10)$$

Donde R_k es la matriz de covarianzas del error de observación, que se le ha impuesto el siguiente valor:

$$R_k = \begin{bmatrix} 1cm^2 & 0 \\ 0 & 1cm^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

En cuanto a Q_k , es la matriz de covarianzas del error de predicción, que se calcula en base al ruido de las entradas de la siguiente manera:

$$Q_k = G_k \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\omega^2 \end{bmatrix} G_k^T \quad (2.12)$$

Donde σ_a y σ_ω son las desviaciones típicas del acelerómetro y del giróscopo, que se pueden hallar experimentalmente o viendo la hoja de datos de los sensores. G_k es el jacobiano del modelo de predicción con respecto las entradas:

$$G_k = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}_k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta t \cos \theta & \Delta t \sin \theta & 0 \\ -\Delta t \sin \theta & \Delta t \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Una vez descrito el modelo completo, ya se tiene todo lo que hace falta para ejecutar los pasos del filtro de Kalman extendido. Dichos pasos se implementarán en la simulación siguiente y el lector que quiera saber sobre ellos puede encontrarlos en [6].

2.3 Simulación del quadrotor y del estimador

En este apartado se implementará un estimador de estados con las características explicadas en este capítulo y se pondrá a prueba con el simulador de un quadrotor. Tanto el estimador como el simulador estarán programados en lenguaje Python¹. El simulador será muy sencillo, describirá el movimiento de un quadrotor en el plano al que únicamente se le aplican la fuerza de la gravedad, un empuje y un par. Estos dos últimos serán generados por un controlador de velocidad vertical y un controlador de ángulo, los cuales toman la velocidad y la inclinación real del vehículo, en lugar de utilizar medidas ruidosas. Sus referencias se han escogido para que desde el reposo, ascienda unos metros, y luego se desplace hacia la dirección negativa del eje x .

Para obtener la evolución de la inclinación θ , se aplica la segunda ley de Newton utilizando el par de actuación τ y la inercia I :

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau}{I} \quad (2.14)$$

Se obtiene la velocidad angular a partir de la integración discreta de la aceleración,

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{i-1} + \Delta t \ddot{\theta} \quad (2.15)$$

y la inclinación a partir de la integral discreta de la velocidad angular:

$$\theta = \theta_{i-1} + \Delta t \dot{\theta} \quad (2.16)$$

¹ En el apéndice A se encuentra el script *main.py* que implementa toda la simulación de manera independiente, sin necesidad de programas externos

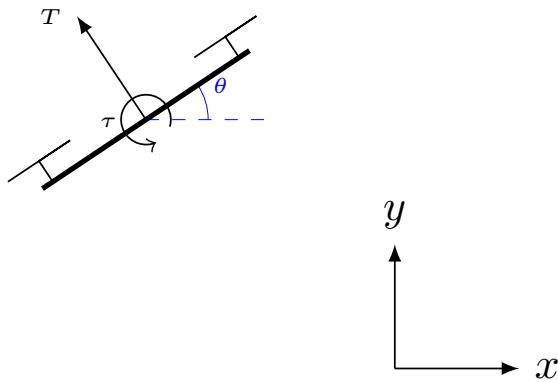


Figura 2.2 Quadrotor en dos dimensiones.

En cuanto a la translación, también se aplica la segunda ley de Newton en ejes inerciales:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{T}_{rot} + \mathbf{F}_g}{m} \quad (2.17)$$

Donde \mathbf{F}_g es la fuerza gravitatoria, y \mathbf{T}_{rot} es el empuje del quadrotor en ejes inerciales, que se calcula estableciendo que siempre tiene la dirección del eje y del cuerpo y que su magnitud es T :

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{T}_{rot} = R \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La velocidad lineal se obtiene a partir de la aceleración calculada previamente,

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{i-1} + \mathbf{a}\Delta t \quad (2.21)$$

e integrando esta última se obtiene la posición:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{i-1} + \mathbf{v}\Delta t \quad (2.22)$$

Una vez se ha simulado esta trayectoria, se pasa ejecutar el estimador de estados. Este toma unas medidas a las que se le ha aplicado un ruido gaussiano y genera su estimación de los estados. Finalmente estos se comparan con los estados reales y se verifica el desempeño del estimador.

2.3.1 Resultados

El primer experimento que se va a mostrar, al estimador de estados no le va a entrar ninguna otra medida que no sea la del giróscopo y la del acelerómetro. En la figura 2.3 se puede apreciar que la estimación de la posición tiene una deriva, ya que no hay ningún sensor que aporte posición absoluta.

En el siguiente experimento se va a fusionar un GPS con un retraso de 1 segundo y un periodo de 300ms. Estos valores son poco realistas pero de esta manera se aprecia más la degradación de la estimación. Se puede ver en la figura 2.4 que el GPS empeora la estimación, ya que en el instante $t = 1s$, la posición estimada se aleja de su valor real porque llega su primera medida. Aquí se puede aprovechar para ver cómo se comporta el filtro de Kalman cuando la medida tiene mucho más error del que se ha especificado. En este caso se le indicó al filtro que tendría una desviación típica de 1 centímetro, mientras que en realidad está cometiendo errores de más de un metro a causa del retraso. También se puede ver la dependencia mutua entre todos los estados: la medida del GPS no afecta solo a los estados de la posición, sino que también a la velocidad y a la orientación.

En el tercer experimento se ha activado el manejo de los retrasos explicado en este capítulo. En la figura 2.5 se tiene que, aunque la medida esté retrasada un segundo, esta no se ve degradada por el GPS ya que no se está fusionando con las medidas más recientes de la IMU, sino con aquellas que llegaron hace un segundo. Es más, la estimación es mejor que en los dos casos anteriores. En la imagen 2.5e se puede ver la desviación típica que estima el filtro (σ), que tiene forma de diente de sierra debido a la llegada periódica de las medidas del GPS. Esta se compara con los valores reales del error, tanto el del filtro de salida como el del EKF. Para este último filtro, el error se calcula como la diferencia entre la estimación con el groundtruth retrasado la misma cantidad de tiempo que dicho filtro. Se puede notar en la imagen, que dicho error no está muy alejado del estimado, sin embargo, el error del filtro de salida es mayor.

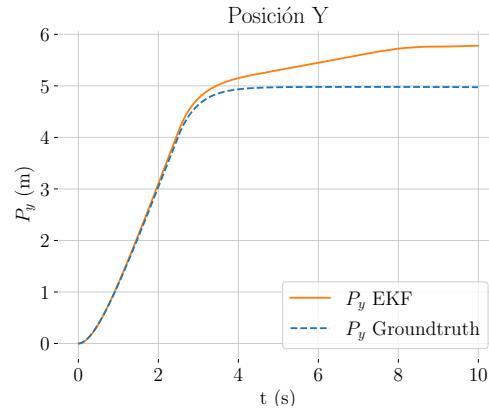


Figura 2.3 EKF no ejecuta la fase de actualización.

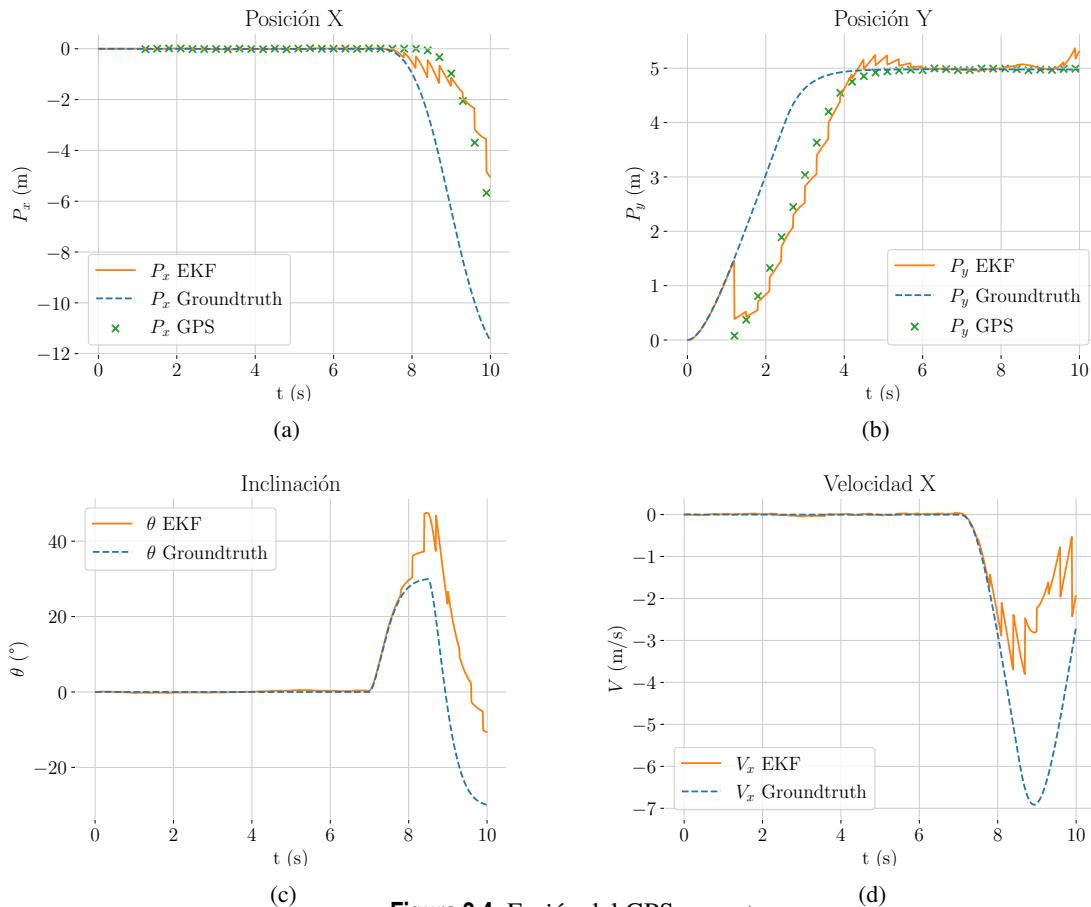


Figura 2.4 Fusión del GPS con retraso.

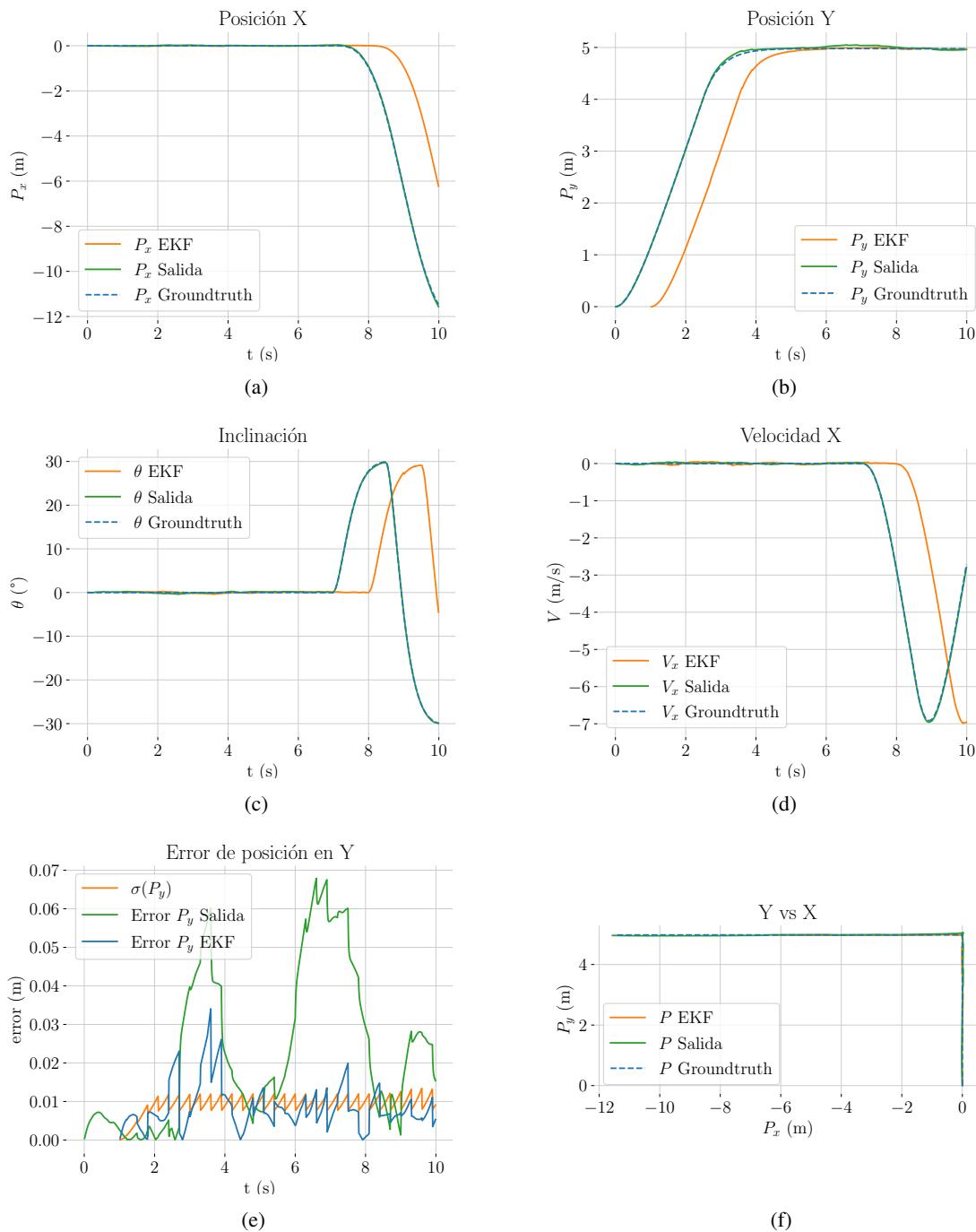


Figura 2.5 Experimento con manejo de medidas retrasadas.

3 Posicionamiento mediante marcadores visuales

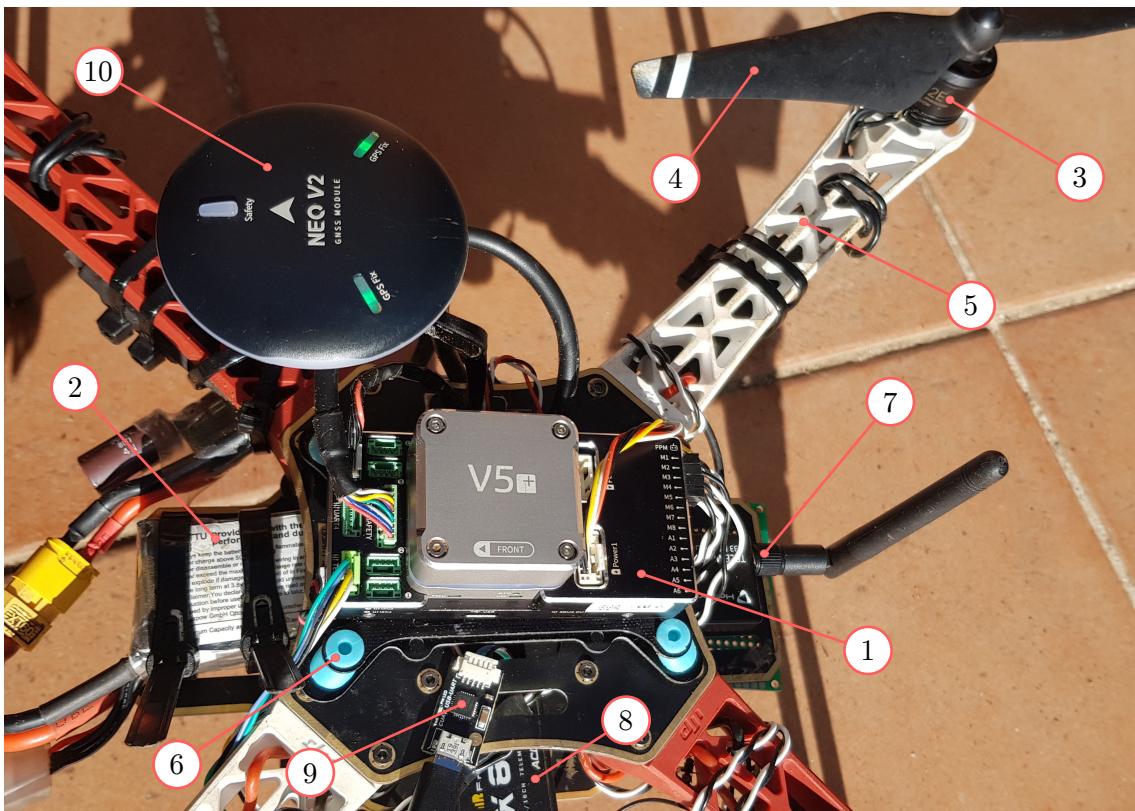
Conseguir con precisión la posición de un vehículo aéreo no tripulado es bastante deseable. En la introducción se comentó aplicaciones como la manipulación de objetos o la navegación cerca de obstáculos. En este capítulo se explica que para conseguirlo, se ha construido un quadrotor con los componentes necesarios para detectar un marcador visual. Además, se comenta cómo se ha programado un ordenador embebido para que procese dicho marcador.

3.1 Componentes

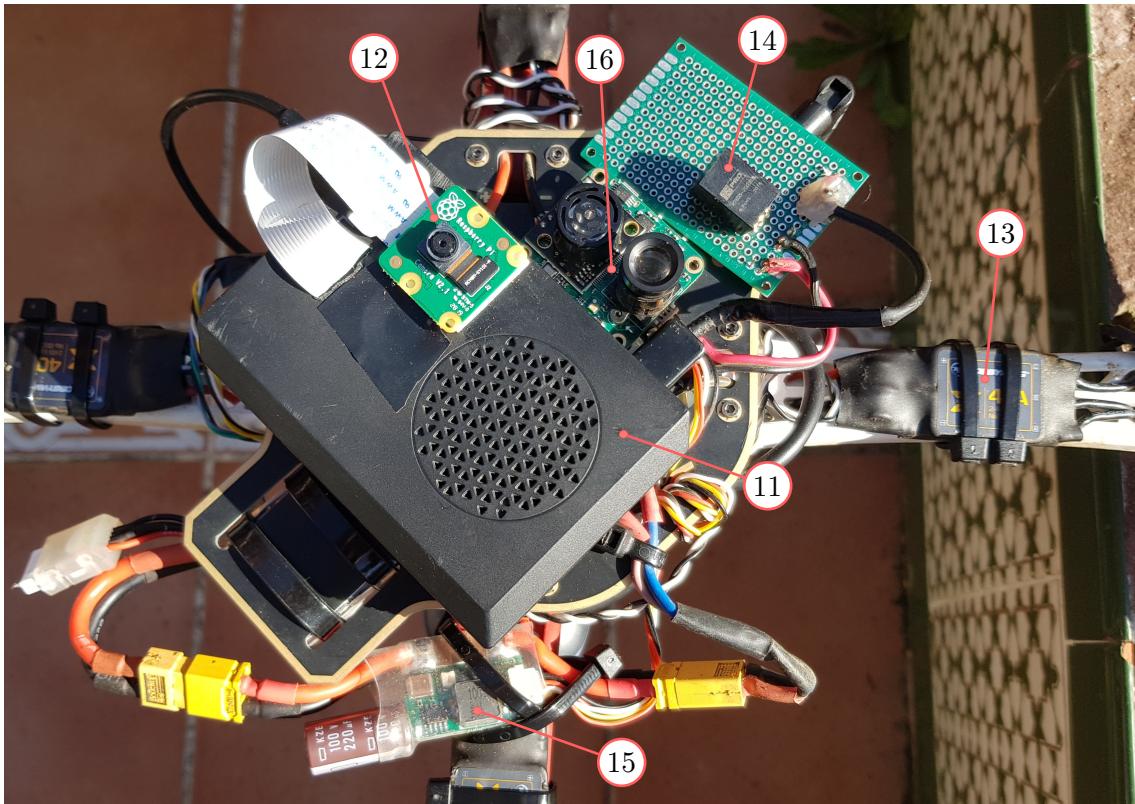
Para elegir los componentes se ha tenido en cuenta que no estén discontinuados, para comprar posibles recambios, la rapidez de llegada ya que todos llegan por paquetería, que estén ampliamente probados, y que en la medida de lo posible, estuvieran liberados tanto su software como su hardware.

1. Cuav V5+. Autopiloto corriendo PX4. Esquemáticos publicados en [Github](#).
2. *Tattu Funfly 1500mAh*. Batería LiPo de 4 celdas.
3. *DJI 2312E 800KV*. Motor sin escobillas.
4. Hélices de fibra de carbono con un diámetro de 9.4 pulgadas y un paso de 5 pulgadas. Según el [fabricante](#) del motor, con esta hélice se consigue un empuje de 850 gramos alimentado a 14.8 V.
5. *DJI F450*. Chasis de quadrotor de 45 cm de diagonal.
6. Cama amortiguadora para el autopiloto¹.
7. Módulo de telemetría *Holybro V3*. Permite una comunicación con la estación de control terrestre.
8. Receptor *X8R*. Recibe hasta 16 canales de la emisora, que este caso es una *Taranis Q X7*.
9. *SILABS CP2102*. Puente USB-UART. Se conecta entre el puerto USB del ordenador embebido y el puerto UART del autopiloto.
10. CUAV NEO V2. Este incluye GNSS, magnetómetro, botón de armado, luces indicadoras y alarma sonora. Se monta más arriba que el resto de componentes para alejarlo de los circuitos de potencia y así reciba menos interferencias el magnetómetro.
11. Raspberry Pi 4 Model B. 4 GB de RAM. Se encuentra protegida por una carcasa que incorpora un ventilador.
12. Raspberry Pi Camera Module v2. Campo de visión horizontal de 62 grados, capaz de grabar vídeo con resolución de 1640x1232 a 40fps.
13. *CUAV HVP M (High-Voltage Power Module)*. Regulador de voltaje para alimentar el autopiloto. Además, lee el voltaje y la corriente que suministra la batería.

¹ Este componente, al igual que muchos otros, fue comprado en la tienda online [rc-innovations.es](#)



(a) Vista desde arriba.



(b) Vista desde abajo.

Figura 3.1 Componentes del quadrotor.

14. *Hobbywing XRotor 40A*. Variador de velocidad o ESC. Estos están sobredimensionados ya que fabricante recomienda unos que soporten como mínimo una corriente de 20A.
15. *RS PRO K7805-2000R3L*. Reductor de voltaje de 5V y 2A. Este se utilizará para alimentar el ordenador embebido a partir de la batería. Su voltaje permitido de entrada está entre los 8V y los 32V, lo cual es adecuado para una batería LiPo de 4 celdas.
16. *CUAV PX4FLOW 2.1*. Sensor de flujo óptico. También tiene su software liberado y el esquemático de una versión anterior.
17. Extensor de piernas. Estás fueron impresas mediante la empresa [Impresion 3D LowCost](#) con un modelo tomado de la página [Thingiverse](#). Son necesarias ya que el chasis tiene unas patas demasiado cortas y no dejaban espacio para la Raspberry Pi y su cámara.

3.2 Programa ejecutado en el ordenador embebido

De forma resumida, la cámara, que se ha colocado en la parte inferior del quadrotor y conectada al ordenador embebido, captura imágenes de un marcador que se ha impreso y se ha colocado en el suelo. Este ordenador las procesa y genera una posición estimada del UAV con respecto al marcador, que es enviada al autopiloto a través del puerto serie. El autopiloto la fusiona en su estimador de estados y genera una posición estimada que alimenta al controlador de posición. El controlador de posición toma esta medida y sigue la referencia. Esta última puede venir o bien del mando, o bien del ordenador embebido el cual le indique una trayectoria.

Nótese que el controlador de posición también se podría haber ubicado en el ordenador embebido, generando consignas de inclinación al autopiloto. La desventaja de esto es que se no se utilizan los demás sensores para el posicionamiento. De la manera que aquí se ha implementado, si en un instante falta la medida de la visión, el autopiloto podría tomar otras como la del acelerómetro, el GPS o el flujo óptico, para fusionarlas en su estimador de estados mientras se espera a que se recupere la medida de la visión.

En la figura 3.2 se puede ver el diagrama de flujo del programa que se corre en la Raspberry Pi, cuyos pasos se detallarán a continuación.

1. Inicialización:

En este paso se espera a detectar el autopiloto y se leen los parámetros de un archivo dedicado a ello.

2. Recoger imagen de la cámara:

Este paso podría llegar a ser muy lento si no se escoge una interfaz con la cámara adecuada, por ejemplo USB. En este caso se ha escogido CSI, que lleva la imagen directamente a la GPU y esta la transfiere a la RAM mediante DMA². Esta tiene la desventaja que el cable es plano y más difícil de torsionar. La ventaja es que la imagen llega a la RAM sin consumir tiempo de CPU, permitiendo que esta haga en paralelo otras operaciones como el procesamiento de imagen.

3. Detectar marcadores:

El objetivo es ubicar los marcadores en la imagen (en concreto sus 4 esquinas) y extraer su identificador. Este proceso será explicado en la sección 3.3.

4. Estimación de la posición:

La estimación de la posición y la orientación se realiza tomando las 4 esquinas de los marcadores obtenidos en el paso anterior. Este problema se denomina PnP (Perspectiva desde n puntos) y su solución es iterativa. Parte de que, dados unos puntos 3D en el espacio, expresados en un sistema de referencia exterior a la cámara y dada la posición de la cámara con respecto a dicho sistema de referencia, se puede predecir qué posición en el plano de la imagen tendrían esos puntos al ser proyectados. Lo que se busca es exactamente lo contrario: la posición de la cámara con respecto a dicho sistema de referencia, a partir de la proyección en la imagen de los puntos tridimensionales. Lamentablemente no se puede invertir las ecuaciones y por tanto no se puede obtener una solución analítica. Para hallar la solución se recurren a algoritmos de optimización que van probando posiciones de la cámara, hacen proyecciones suponiendo esa posición y se compara con las proyecciones reales. A la diferencia de estas dos proyecciones se le denomina *error de reproyección* y es el valor que se trata de minimizar. Para este proyecto este problema no se ha tenido que implementar, solo se ha tenido que llamar a la función *estimatePoseSingleMarkers* de la librería Aruco, que a su vez llama a la función *solvePnP* de OpenCV.

² Para más información del proceso de captura visitar la excelente documentación de la interfaz Python de la cámara: <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/fov.html#division-of-labor>

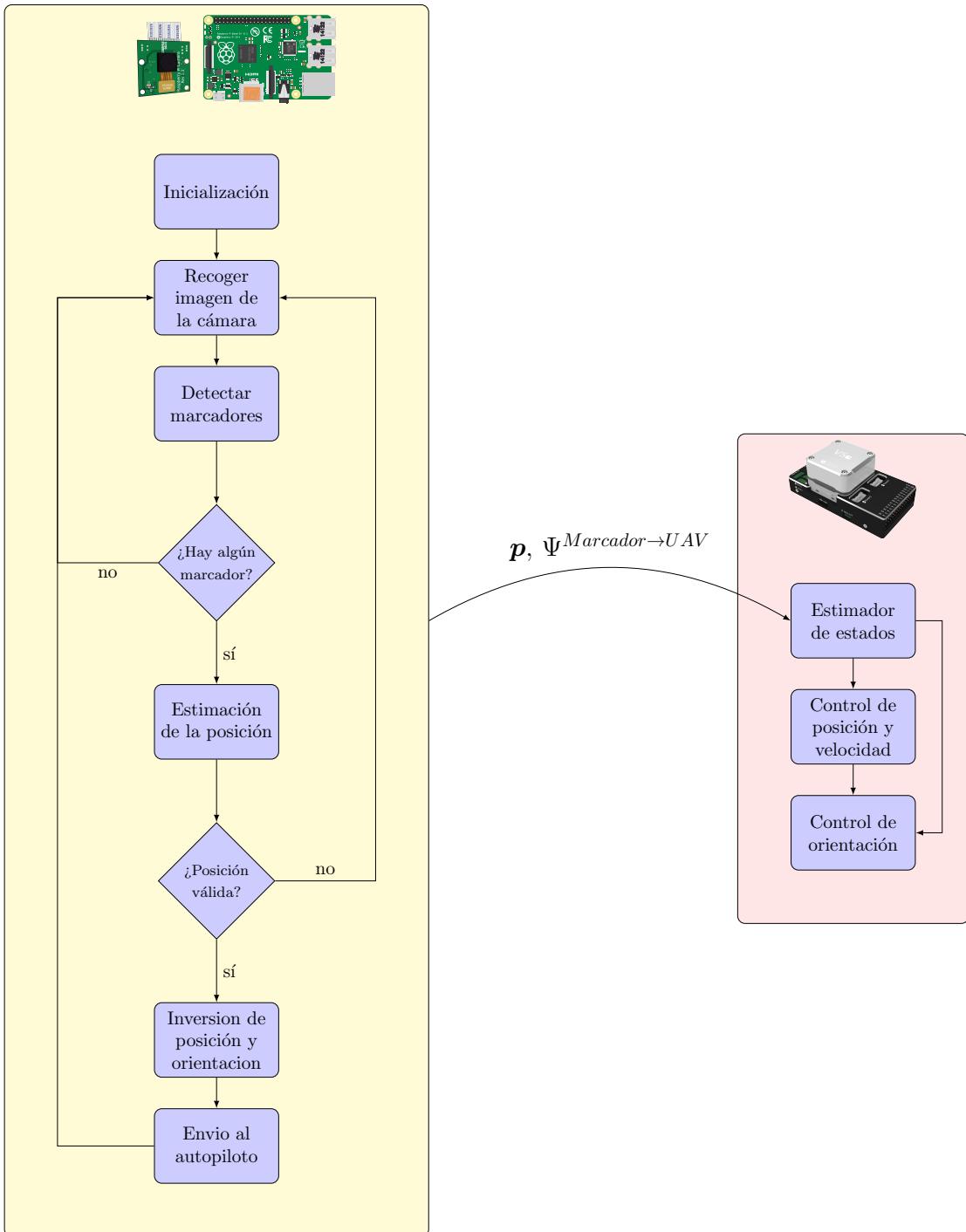


Figura 3.2 A la izquierda: diagrama de flujo del programa que se corre en el ordenador embebido, a la derecha: algunas de las tareas del autopiloto.

5. Inversión de la posición y orientación:

Como se ve en la figura 3.3, hay varios sistemas de referencia que entran en juego, y hay que tenerlos presentes para transformar desde lo que aporta la estimación de la posición del paso anterior, hasta lo que necesita el autopiloto. En primer lugar está el sistema de referencia **NED**, que es aquel cuyos ejes x , y y z están apuntando hacia el norte, este y abajo respectivamente, y cuyo origen se sitúa en la posición desde la que partió el **UAV**. Este último tiene un sistema de referencia con su eje x apuntando hacia la dirección de avance y su eje z apuntando hacia el suelo cuando no está inclinado. Un poco más para abajo, pero para los cálculos, considerado en la misma posición que el anterior, se encuentra el sistema

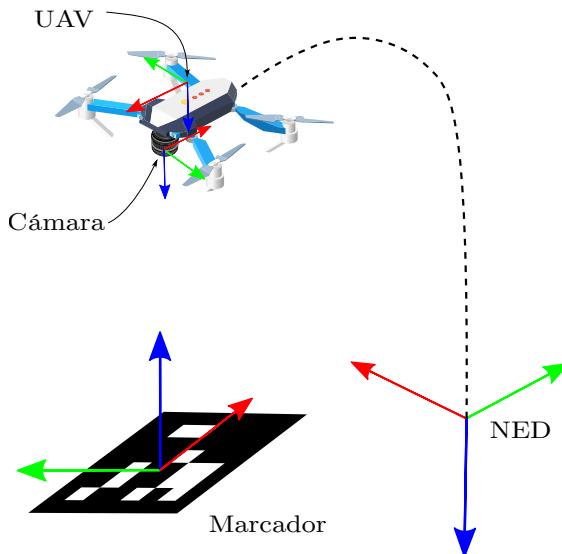


Figura 3.3 Sistemas de referencia presentes en el problema.

de referencia de la **cámara**, el cual tiene el sistema convencional ellas: si se viese una fotografía tomada por esta, su eje x apuntaría hacia la derecha, su eje y hacia abajo y su eje z hacia fuera de la cámara. Por último, se puede ver el sistema de referencia del marcador, cuyo eje z apunta hacia arriba y los otros dos son paralelos a los bordes del marcador. A parte de los que vienen dibujados, se definirán más adelante, unos sistemas auxiliares $Cámara'$ y NED' que son derivados de los anteriores.

En el paso anterior, la orientación y posición que se obtiene es la del **marcador con respecto a la cámara**, es decir se obtiene $R^{Cámara \rightarrow Marcador}$ y $p^{Cámara \rightarrow Marcador}$. Lo primero que se realiza es buscar la orientación de la cámara con respecto al marcador. Para ello tenemos que invertir la orientación dada, la cual al estar expresada en forma de una matriz de rotación, se puede obtener mediante su traspuesta:

$$R^{Marcador \rightarrow Cámara} = (R^{Cámara \rightarrow Marcador})^T \quad (3.1)$$

Dicha matriz se utiliza para expresar la posición del marcador en unos ejes paralelos a los ejes del marcador.

$$p^{Cámara' \rightarrow Marcador} = R^{Marcador \rightarrow Cámara} \cdot p^{Cámara \rightarrow Marcador} \quad (3.2)$$

Nótese que esta posición sigue teniendo origen en la cámara, solo que ahora está rotado el sistema de referencia en el que se expresa. Lo que se quiere obtener es la posición con respecto al sistema de referencia del marcador, el cual es paralelo al que se está expresando ahora. Siempre que existen dos sistemas de referencia A y B, con la misma orientación pero ubicados en distintos puntos, se debe de negar la posición de A con respecto a B para conseguir la posición de B con respecto a A. Por esta razón la posición que finalmente se le manda al autopiloto es la negada de la obtenida en la última ecuación.

$$p^{Marcador \rightarrow Cámara'} = -p^{Cámara' \rightarrow Marcador} \quad (3.3)$$

En cuanto a la orientación, como se ve en la figura 3.3, los ejes de la cámara y los del UAV están rotados 180° con respecto al eje z . Conociendo esto, se obtiene la orientación del marcador vista desde el sistema de referencia del UAV:

$$R^{UAV \rightarrow Cámara} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$R^{UAV \rightarrow Marcador} = R^{UAV \rightarrow Cámara} \cdot R^{Cámara \rightarrow Marcador} \quad (3.5)$$

Obviamente, la multiplicación se tiene realizar en ese orden. De esta manera, la rotación se realiza con respecto al eje z de la cámara, mientras que si se hubiese invertido el orden, es decir se postmultiplica a $R^{Cámara \rightarrow Marcador}$, la rotación se hubiese hecho alrededor del eje z del marcador. Finalmente, esta última matriz se transpone para tener la orientación del UAV con respecto al marcador.

$$R^{Marcador \rightarrow UAV} = (R^{UAV \rightarrow Marcador})^T \quad (3.6)$$

Tras expresar esta rotación en ángulos de Euler, ya se podría enviar al autopiloto. Estos cálculos están implementados a partir de la línea 250 del archivo *marker_vision.h* que se ha incluido en el anexo.

6. Envío al autopiloto:

La orientación y la posición son enviadas al autopiloto a través del protocolo *Mavlink* utilizando la librería *MAVSDK*

Mientras tanto, **en el autopiloto**, una vez que las recibe, este calcula la rotación entre su orientación expresada en ejes NED y su orientación expresada en el sistema de referencia de la visión, que en este caso es el del marcador.

$$R^{NED \rightarrow Marcador} = R^{NED \rightarrow UAV} \cdot (R^{Marcador \rightarrow UAV})^T \quad (3.7)$$

Esta matriz se utiliza para transformar la posición que le llega de la visión, expresándola en ejes NED (norte, este y abajo).

$$p^{NED' \rightarrow UAV} = R^{NED \rightarrow Marcador} \cdot p^{Marcador \rightarrow UAV} \quad (3.8)$$

Siendo NED' un sistema de referencia paralelo a NED pero centrado en el marcador. Que tengan esta orientación es importante, ya que el EKF en su fase de predicción, utilizando el acelerómetro y la orientación estimada, expresa su posición en ejes NED. Estos cálculos se pueden ver el código 3.1 donde se han extraído algunos fragmentos de PX4.

Código 3.1: Rotación en PX4 de la posición suministrada por la visión

En el archivo *ekf_helper.cpp* se calcula la rotación que hay que aplicarle a la posición:

```
1460     const Quatf q_error(_state.quat_nominal *
1461                           _ev_sample_delayed.quat.inversed()).normalized();
1462     _R_ev_to_ekf = Dcmf(q_error);
```

En el archivo *control.cpp* se aplica dicha rotación:

```
273     ev_pos_meas = _R_ev_to_ekf * ev_pos_meas;
274     ev_pos_var = _R_ev_to_ekf * ev_pos_var * _R_ev_to_ekf.transpose();
```

Con estas transformaciones ya se podría fusionar la medida de la visión. Así, se generarán unos estados estimados que serán tomados por los controladores de PX4. Como se explicó en [6], estos forman una estructura en cascada cuyo controlador de mayor nivel es el de posición.

3.3 Detección de marcadores Aruco

Los marcadores Aruco fueron creados por el departamento Aplicaciones de la Visión Artificial de la universidad de Córdoba. Estos pertenecen a la categoría de marcadores visuales planos y cuadrados, y su misión es ofrecer su posición relativa a la cámara además de identificarlo. Como se aprecia en la figura 3.4, estos son cuadrados que tienen en su interior unas figuras que codifican un número en binario. Esta zona interna solo se

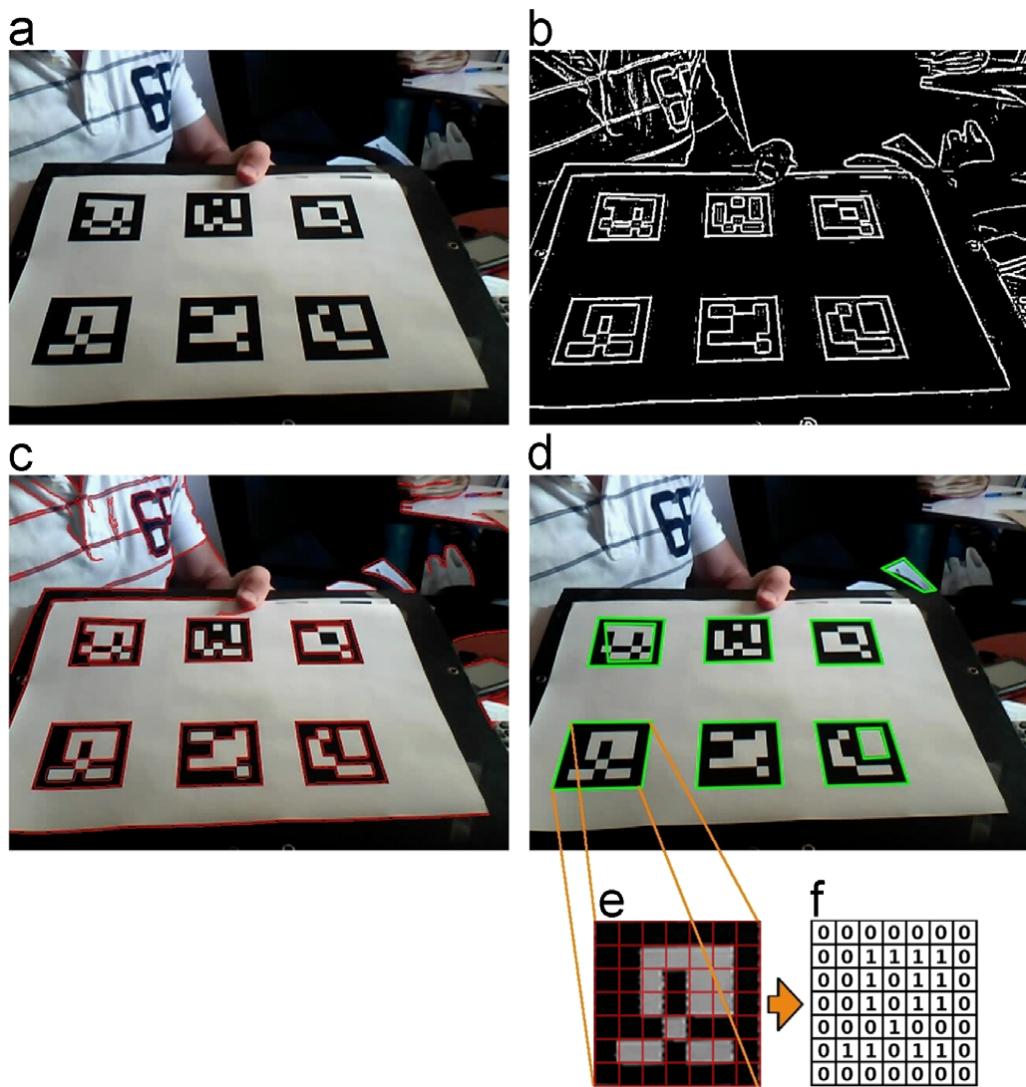


Figura 3.4 Pasos intermedios en el proceso de detección de marcadores Aruco. Fuente [7].

utiliza en la identificación, mientras que le borde exterior es el que se usa para la estimación de la posición. El proceso de detección está explicado en [7] pero aquí se hará un resumen del mismo. Los pasos principales son los siguientes:

- Detección de bordes:

Se denomina borde a la línea que separa 2 regiones, en el caso de los marcadores estas regiones son las zonas blancas y las negras. Aunque no es usado en este caso por su coste computacional, el algoritmo de Canny puede servir para explicar un método de detección de bordes. Quienes no estén familiarizados con el campo de la visión artificial, se pueden imaginar la imagen en escala de grises como un campo escalar de 2 dimensiones, y como tal, se le puede calcular el gradiente a cada punto del plano, que es un vector de dos dimensiones que indica la dirección en la que el campo varía más rápidamente y su módulo representa el ritmo de variación. Para distinguir un borde de cualquier otro punto este es útil, ya que en un punto del borde se cumple que su magnitud de gradiente es máximo local en la dirección del gradiente. En la subfigura 3.4b puede verse un ejemplo del resultado de este proceso.

- Detección de contornos:

En el paso anterior es posible que se hayan escogido bordes que no formen un contorno cerrado, por lo que se busca todos los contornos cerrados formados por los bordes y el resto se desechan (figura 3.4c). El contorno que se quiere obtener es el borde externo del marcador, cuya forma es un cuadrado y su proyección en la imagen será aproximadamente un cuadrilátero, por tanto se descartan todos los que no

se aproximen a un polígono de cuatro lados. Todavía puede haber contornos que no se correspondan a lo que se busca, por ejemplo los cuadrados que se encuentren dentro del marcador que se destinan a la identificación, así que se realiza otro cribado más que es el de eliminar los contornos interiores que estén contenidos en otros exteriores y que sean cercanos, quedando los contornos de la figura 3.4d.

- Identificación:

Cada uno de los contornos se rectifica para convertirlos en cuadrados y entonces la imagen se convierte en una cuadrícula. Como se puede ver en la figura 3.4f, en este ejemplo es de tamaño 7X7, donde cada celda se le asigna un 0 o un 1. De esta cuadrícula, en la que todas sus celdas más externas tienen que ser negras (si no se descarta), se extrae un código binario que en este caso es de 25 bits (quitando los bordes negros la cuadrícula se convierte en 5X5). Finalmente, se compara este código con todos los que componen el diccionario³, y si se da alguna coincidencia se da por válida la detección.

Existen más librerías de marcadores planos como *AprilTag*, cuyo método de detección es muy parecido a *Aruco* (de hecho la librería de Aruco puede detectar marcadores AprilTag). Una de las partes en las que sí que difieren es la generación de los diccionarios de marcadores. Un diccionario se le denomina a todos los códigos binarios diferentes que pueden tener los marcadores con un determinado número de bits. Este número de marcadores distintos no es igual a $2^{\text{número de bits}}$ por varias razones. Primero, el marcador tiene que dar información de la rotación con respecto a la cámara y por lo tanto, no puede ser simétrico para que no se dé el caso de que existan dos rotaciones posibles en una sola imagen. Segundo, se debe de contemplar el caso de que exista ruido, y tal vez el código extraído no es el que realmente tiene el marcador. Entonces se reduce el número de posibles códigos de manera que no exista dos marcadores cuya diferencia solo esté en uno o pocos bits (maximizar distancia de Hamming). De esta manera, se evitan falsos positivos y se puede llegar a corregir los errores.

Una posible duda que puede surgir es si es necesario el paso de identificación cuando en una aplicación solo se usa un marcador, por ejemplo para el aterrizaje de precisión. Existen formas mucho más simples que pueden ser detectadas por la cámara como los tableros de ajedrez. Sin embargo, nada nos garantiza que estas formas la podamos encontrar también en el entorno, sobretodo en construcciones humanas, y que se produzca una detección no intencionada.

3.4 Metodología de la experimentación

Cuando se tratan problemas que tienen una implementación en el mundo real o se realizan simulaciones complejas, para llegar a la solución normalmente existen 2 etapas bien diferenciadas. La primera consiste en el **estudio teórico** del problema y en la planificación antes de realizar ningún experimento. En esta diseñamos un sistema y elegimos unos parámetros de acuerdo a expresiones analíticas o simulaciones. Después de realizar el primer experimento se llega a la etapa de **pruebas de validación**. En esta se realizan experimentos, se analizan los resultados y si no cumplen las especificaciones se vuelve a realizar el experimento con otro diseño o parámetros. Se podría imaginar un escenario en el que solo se pasara por una de las etapas, por ejemplo por la primera. Esto sería lo ideal, ya que cada parámetro o configuración está definida a priori y le respaldan los modelos matemáticos. Sin embargo, a veces el entorno real no es completamente predecible, los modelos no funcionan o simplemente te has equivocado con los cálculos. Yéndose al otro extremo, en el que no se realiza ningún estudio, pero se generan muchos experimentos, el primer problema que aparece es el valor inicial de los parámetros. También puede darse que los experimentos sean caros o que existe un riesgo de rotura del equipo. Además, surge la duda de cuales serán los siguientes parámetros a probar si no funciona el primer experimento ya que si no se conoce el sistema no se tiene una idea de qué efecto pueden provocar la modificación de los mismos. Por ejemplo, si se quisiera buscar los valores de los controladores PID de un quadrotor, aunque no se realicen cálculos para obtener un valor analítico, si se conoce su teoría de funcionamiento, la iteración de los parámetros se haría de una forma más acertada.

Dicho esto se puede concluir que no se pueden descuidar ninguna de las dos etapas, que hay que dedicarle tiempo tanto a la comprensión de un problema como a la realización de experimentos y a la capacidad de iterar rápidamente. En esta sección se va a explicar cómo se ha afrontado la etapa más experimental, en concreto sus pasos de iteración de parámetros y registro de resultados.

³ Los diccionarios se definen a continuación

3.4.1 Iteración de los parámetros

En este problema hay muchos parámetros que frecuentemente se necesitan modificar:

- Propiedades de la cámara. A menudo se tiene que modificar el tiempo de exposición de la cámara dependiendo de la iluminación del entorno. Conviene escoger el mínimo valor con el que se obtenga una imagen iluminada, para que movimientos rápidos de la cámara no produzcan un emborronado de los contornos. También se puede escoger la resolución de la captura haciendo balance entre la rapidez de cálculo y la discretización espacial de la imagen
- Propiedades del marcador. Uno de los aspectos que hay que decidir del marcador es su tamaño, que determinará la altura óptima a la que el UAV volará sobre el marcador. En este trabajo no se detallará, pero existe la posibilidad de utilizar un tablero de marcadores⁴ en lugar de uno solo para tener una estimación más precisa y permitir la oclusión. De estos hay que establecer el número de marcadores: a la vez que se capturen más marcadores en una imagen, mayor será la precisión, pero también se verán reducidos para un tamaño dado.
- Activación de funcionalidades. El programa se debe hacer lo más flexible posible, permitiendo por ejemplo que se pueda correr en un ordenador personal con un vídeo previamente grabado, en lugar de una cámara como fuente de visión. En este caso se debe de desactivar la comunicación con el autopiloto. Otra aspecto que cambia es la activación del guardado de resultados, ya que cuando el programa se esté ejecutando en el ordenador embebido esta tarea no conviene realizarse debido a lo lento que es escribir en el almacenamiento persistente (memoria SD).

En programación, los parámetros se pueden establecer de muchas maneras diferentes. La más básica de todas es estableciendo su valor en una constante en el código del programa. Esto tiene la desventaja de que cuando no se utiliza un lenguaje interpretado, hay que compilar el programa cada vez que se cambie un parámetro. Otra manera es mediante argumentos al llamar al programa por la línea de comandos. De esta manera no es necesario compilar cada vez que se toque un parámetro, su inconveniente es que hay que escribir todos los parámetros cada vez que se llame al programa, incluso aquellos que no han cambiado de una ejecución a otra. La forma que se ha utilizado en este trabajo es mediante un archivo de parámetros. Este es leído en tiempo de ejecución y su sintaxis es YAML. Se podría haber escogido otros formatos como el JSON, pero este no es tan leible para los humanos como el primero. Este archivo se puede ver en el anexo bajo el nombre de [vision_params.yml](#)

Otra posible solución más sofisticada, es la que se usa en el autopiloto PX4. Este ofrece una interfaz gráfica que se corre en la GCS y se comunica con el autopiloto. Entre sus funcionalidades destacan la indicación de que alguno se haya movido de su valor por defecto, sus valores máximos y mínimos, y su posible modificación en tiempo de vuelo. Esta última característica, que puede acelerar la elección de parámetros, lleva a poner en duda a llamar los parámetros como tales si se toma su definición de valores que no cambian a lo largo de un periodo largo de tiempo.

3.4.2 Registro de resultados (*logging*)

Para analizar los resultados primero hay que registrarlos. A continuación, se comenta algunas de las funcionalidades implementadas relacionadas con el *logging*:

- Guardado de la posición y orientación estimadas en un archivo y su representación temporal:

Para verificar el desempeño de la estimación de la posición y orientación, lo ideal sería tener un groundtruth, por ejemplo mediante un sistema de visión como *OptiTrack*. En este caso no se tiene y lo que nos queda es inspeccionar los resultados de manera visual, que es suficiente para hallar muchos de los errores de la estimación. Hay que tener en cuenta que se tiene un sistema dinámico y ni la posición ni la velocidad pueden cambiar bruscamente, por lo tanto, si al inspeccionar las gráficas temporales de la posición y orientación esto sucede, probablemente se trate de una estimación errónea.

- Guardar las imágenes de la cámara con los ejes del marcador superpuestos (realidad aumentada):

Otra forma de verificación es la de ver los ejes del marcador superpuestos en la imagen (figura 3.5). Resulta fácil de inspeccionar si estos se encuentran en el centro del marcador, que es donde se sitúa su sistema de referencia. Además, sus ejes *x* e *y* deben de ser paralelos a los bordes del papel y su eje *z* perpendicular a él. En la imagen también aparece superpuesto un rectángulo que rodea al marcador, que resulta útil para comprobar que la detección de sus esquinas se realiza de manera correcta.

⁴ Mas información sobre los tableros de marcadores en https://docs.opencv.org/4.5.0/d7/d4a/tutorial_charuco_detection.html



Figura 3.5 Superposición de los ejes de referencia del marcador y del cuadrilátero que lo rodea (trazado en verde).

- Scripts en lenguaje *Python* de inicio y apagado:

A pesar de ser un lenguaje de ejecución rápida, C++ suele ser más difícil para el desarrollador. En cambio Python es un lenguaje que necesita menos líneas de código para hacer lo mismo, tiene una sintaxis más simple y una cantidad enorme de librerías. Por esta razón, en el programa principal escrito en C++ se han hecho llamadas a scripts de Python en su arranque y finalización, ya que estos son los momentos en los que es menos crítico el tiempo de ejecución. En concreto, una de las tareas de estos, es la de crear una carpeta cuyo nombre es la fecha y hora, donde se guardarán los archivos que se han visto en los puntos anteriores. Además, en la finalización del programa se guardan los parámetros elegidos en dicha carpeta y se genera un archivo de vídeo a partir de todas las imágenes tomadas por cámara que se han estado guardando. El guardado de sucesivos experimentos en carpetas distintas es bastante **útil para hacer comparaciones**.

Todos las pruebas anteriores son para evaluar el programa de detección de marcadores de manera aislada. Si se quiere comprobar la fusión de la medida y la posición estimada que se genera finalmente en el autopiloto, hay que utilizar las herramientas de PX4. Este aprovecha el método de comunicación entre sus módulos, que es mediante mensajes de publicador y suscriptor, para guardar estos en una memoria persistente. Si se tiene una tarjeta SD suficientemente rápida, se puede guardar los mensajes a la misma frecuencia de actualización del autopiloto (400Hz) sin perder ninguno. Toda la información, tanto parámetros como mensajes intercambiados entre los módulos o alertas, se almacena en un archivo binario en un formato llamado *ulog*. Existen varias herramientas para representar su contenido, por ejemplo, la que se ha usado aquí ha sido *FlightPlot*. Estos archivos tienen otra utilidad para los desarrolladores que se denomina *System-wide replay*, que es utilizada para correr el autopiloto en el ordenador personal, pero en lugar de simular un vuelo, se le aplican los estímulos guardados por el archivo *ulog*. La gran ventaja de esto es activar la ejecución paso a paso y acceder a todas aquellas variables intermedias que serían más difícil de obtener cuando el vehículo estuviera volando.

3.5 Resultados experimentales

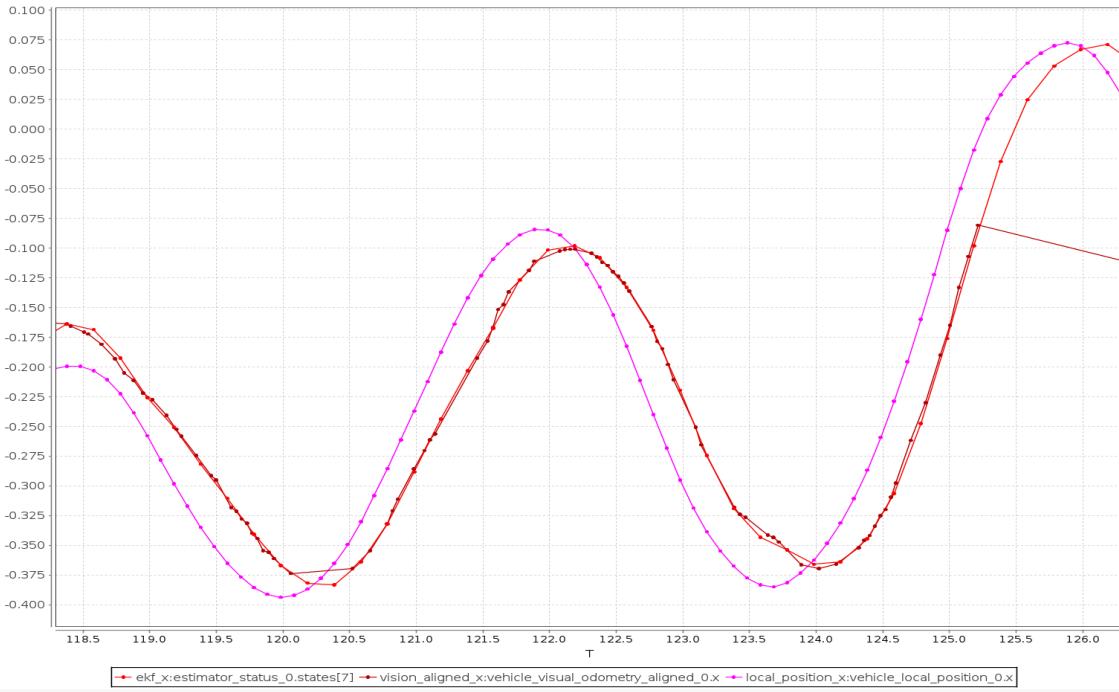
En esta sección se mostrarán algunas gráficas⁵ de los datos generados en un vuelo donde el quadrotor volaba sobre un marcador y el autopiloto recibía las medidas de la visión, y en el que estaban desactivados tanto el GNSS como el flujo óptico.

En primer lugar, se tuvo activado el modo *Altitude*, que es aquel en el que el mando genera una orientación y una altura de referencia, por lo tanto la posición de la visión no se estaba usando todavía por los controladores. En la figura 3.6a, se observa el retraso que hay entre el filtro de salida y el EKF. Se puede medir que este retraso es de aproximadamente un cuarto de segundo, que es justo el retraso que se ha indicado para la visión a la hora de realizar el manejo de medidas retrasadas, explicado en el capítulo anterior. En la figura 3.6b ocurre que en varias ocasiones falta la medida de la visión, probablemente porque el marcador haya salido fuera del campo de visión de la cámara. Se puede observar que mientras esta no se recibe, el EKF sigue

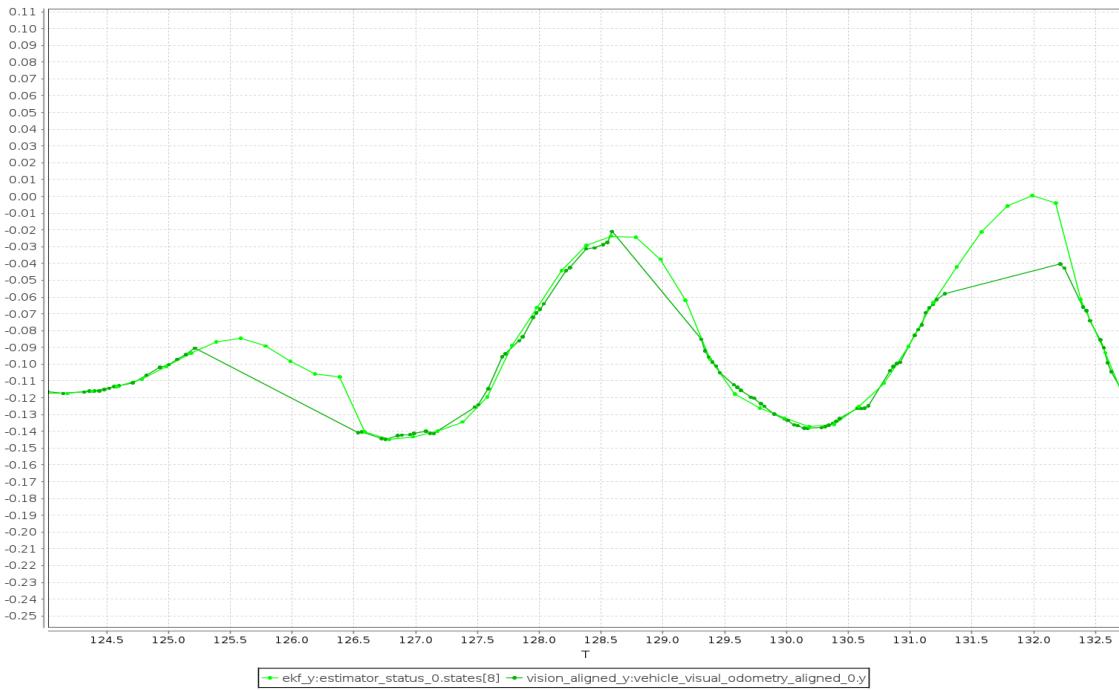
⁵ Todas las gráficas de este vuelo se pueden ver en https://review.px4.io/plot_app?log=0dec276d-c5d0-4f6a-8c57-be72523f9605

estimando gracias a su fase de predicción y también se puede comprobar, que **la predicción no se aleja** mucho de la medida de la visión cuando esta se recupera.

Unos segundos más adelante, se activó durante 10 segundos el modo *Position*, que es aquel en el que se genera una posición de referencia constante si las palancas de los mandos están en su posición de reposo. En la figura 3.7a se observa que la diferencia entre las posiciones más extremas ronda los 5 centímetros. Hay que destacar que al quadrotor le resulta imposible quedarse en un punto fijo sin estas medidas de la visión, ya que no tiene otra fuente de velocidad ni posición absoluta. Esta idea se puede verificar en la figura 3.7b donde se ve que, para quedarse inmóvil, necesita mantener una inclinación que no es distinta de cero, o bien por el efecto del viento, o bien porque el autopiloto no se encuentre en el plano de los ejes de las hélices.

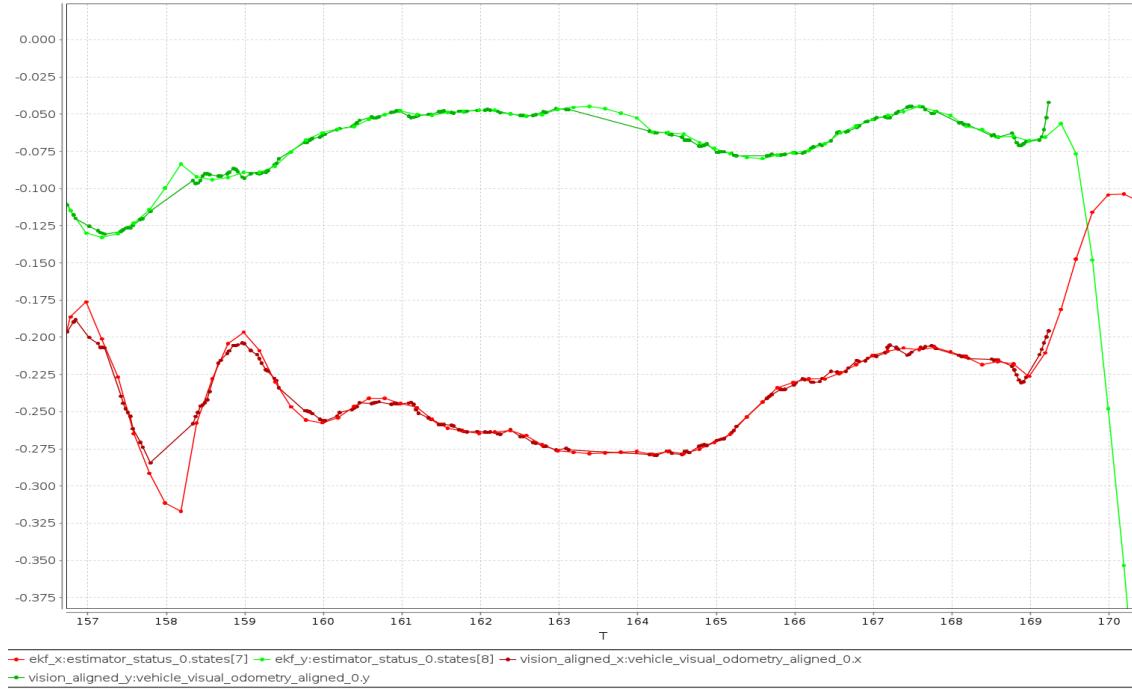


(a) Se muestran: la posición en el eje x generada por la visión (rojo) , la posición estimada por el EKF (rojo oscuro) y la posición generada por el filtro de salida (morado).

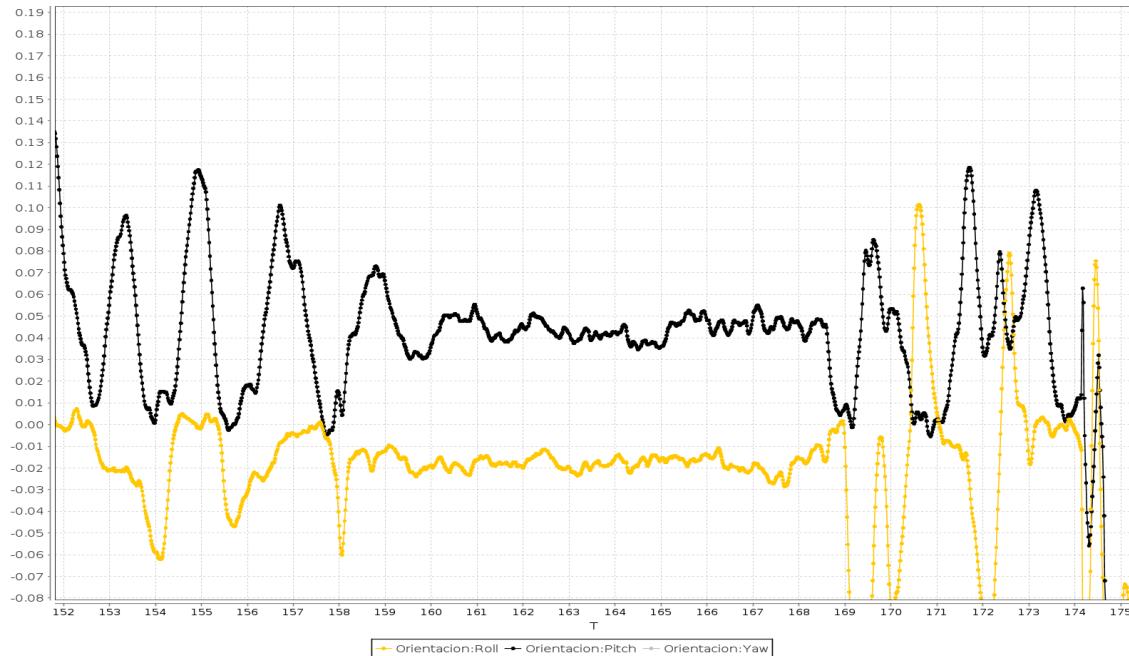


(b) Se muestran: la posición en el eje y generada por la visión (verde) y la posición estimada por el EKF (verde oscuro).

Figura 3.6 Modo *altitude*.



(a) Se muestran: la posición en el eje x generada por la visión (rojo) y por el EKF (rojo oscuro); la posición en el eje y generada por la visión (verde) y por el EKF (verde oscuro).



(b) Ángulos de euler roll y pitch medidos en grados sexagesimales.

Figura 3.7 Modo *position* desde el instante 158s hasta el 168s.

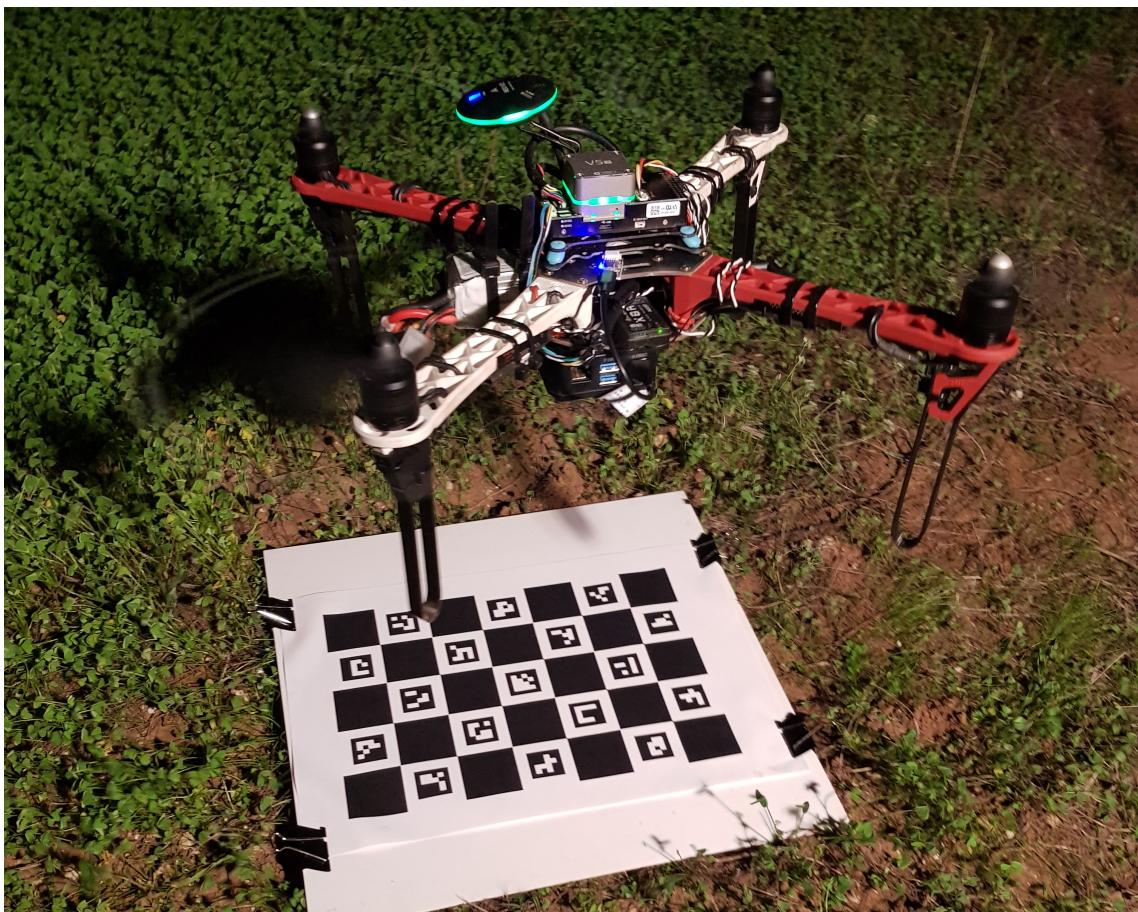


Figura 3.8 Quadrotor sobrevolando un tablero de marcadores.

4 Conclusiones

Los resultados mostrados en este trabajo sirven sacar numerosas conclusiones. Para empezar, el **manejo de medidas retrasadas** aquí explicado, es un método que no requiere de complejas demostraciones para predecir que va a funcionar, ya que es intuitivo. Aun así, se ha probado en una simulación la ventaja que supone tenerlo. Una simulación que se ha programado en un lenguaje de programación abierto, que no tiene ningún coste económico, al contrario que el ampliamente usado *Matlab*, y que además es de propósito más general.

En cuanto al uso de **marcadores visuales para estimar la posición** claramente es una de las opciones más baratas para el posicionamiento, además de ser muy precisa. El ordenador embebido escogido, a pesar de ser de los más económicos, se ha comprobado que tiene capacidad de cómputo suficiente para esta tarea, ya que es capaz de aportar medidas cada 20 milisegundos, que suele ser suficiente para alimentar a un controlador de posición. Por otro lado, tiene una limitación importante: allí donde se navegue se necesita que haya marcadores. Por muy baratos que sea imprimirlos, si se quiere un vehículo completamente autónomo en todos los entornos, no es factible llenar el mundo de marcadores o balizas. Sin embargo, estos podrían servir de apoyo a otras tecnologías que no necesitan ningún tipo de instalación fuera del vehículo.

Una de las ideas de este trabajo que no se ha visto en otros, es la de utilizar el estimador de estados del autopiloto para fusionar medidas de la visión, además del controlador de posición también del propio autopiloto. La ventaja que tiene esta forma frente a aquellos que ubican estos elementos en un ordenador separado, es que se reduce el efecto del retraso en las comunicaciones. La parte perjudicial, es que si las medidas de la posición no son correctas, pueden llegar a afectar a la estimación de la orientación del vehículo, ya que en un filtro de Kalman todos los estados pueden estar interrelacionados. Por otra parte, se ha visto que el filtro de Kalman puede ayudar en aquellos momentos en los que se pierde la visión del marcador, llegando a predecirla de manera acertada si no transcurre mucho tiempo sin llegar una nueva medida de la posición.

5 Trabajos futuros

Existe una gran oportunidad en seguir construyendo sobre la base que presenta este trabajo, ya que la posibilidad de conseguir un posicionamiento preciso, libera muchas de las tareas que hasta ahora necesitaban de un piloto para llevarse a cabo. A continuación, enumero algunos de los próximos pasos que serían interesantes de tomar en próximos proyectos:

- Conseguir la navegación en distancias más grandes únicamente usando marcadores. El número de marcadores que se sería necesario colocar por el camino vendría limitado por el campo de visión de la cámara. Para evitar llenar el espacio de ellos, se podrían intentar algunas soluciones alternativas como utilizar lentes ojo de pez, colocar más de una cámara, o montar la cámara sobre una plataforma articulada (gimbal).
- Cuantificar en tiempo real la incertidumbre de la estimación de la posición mediante marcadores. Este tipo de medida, es un caso de aquellas que varían mucho su precisión en poco tiempo, al igual que la exactitud del GNSS depende del número de satélites que detecte. En este trabajo se ha supuesto que la precisión de la visión tiene un valor constante de un centímetro, cuando en realidad depende fuertemente de factores como la distancia entre el marcador y la cámara. Esta incertidumbre se podría cuantificar, por ejemplo, mediante el error de reproyección mencionado en la sección 3.2.
- Generar marcadores más discretos o incluso, que puedan ser confundidos con elementos decorativos.
- Utilizar otros sensores que aporten posición o velocidad para que se siga conociendo la posición aún cuando no haya marcadores, como el GNSS o el flujo óptico. Uno de los retos que plantea son las transiciones entre las diferentes fuentes de posición o la presencia de varias de ellas al mismo tiempo.
- Aprovechar la precisión de la posición para **manipular objetos**. Si no se generasen muchas interferencias al magnetómetro, se podría utilizar un electroimán para tomar y depositar objetos. Este podría colgarse del UAV mediante varios hilos, ya que con uno solo la carga se balancearía.
- Tomar imágenes en el vuelo, para luego unirlas y crear un mapa donde se puedan especificar los waypoints.
- Crear un nuevo **generador de trayectorias**. El que hay implementado en PX4 consiste en especificar waypoints en un mapa de imágenes satelitales. Para especificar trayectorias de manera más precisa, se podría grabar las posiciones que recorre el vehículo en un modo manual y luego repetirlas de manera automática, de una forma similar a la programación de brazos manipuladores.

Apéndice A

Simulador del estimador de estados

El siguiente archivo también puede verse y descargarse en el repositorio https://github.com/isidroas/quadrrotor_simulator

```
1 #!/bin/env python3
2 import numpy as np
3 from numpy.random import randn
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import matplotlib
6 from scipy.ndimage.interpolation import shift
7
8 import time
9 from pdb import set_trace
10 import os
11 import datetime
12
13
14 # Parameters
15 DATA_L = 1000
16 MASS = 1 # Kg
17 G_CONSTANT = 9.8 # m/s^2
18 INERTIA = MASS * 0.45 ** 2 / 12 # Kg.m^2
19 DT = 0.01 # s
20
21 ACCEL_NOISE = 0.25 # m/s^2
22 GYRO_NOISE = 0.03 # rad/s
23 GPS_NOISE= 0.01 # m
24 GPS_DELAY = 1 # s
25 GPS_PERIOD = 0.3 # s
26
27 # Plot flags
28 DRAW_ESTIMATED = True
29 SHOW_ANIMATED = False
30 SHOW_PLOTS = False
31 SHOW_OUTPUT_CORRECTION = False
32 SHOW_OUTPUT_DELAYED= False
33 SHOW_OUTPUT_ERROR= True
34 IMAGE_FOLDER = "images/"
35 #IMAGE_FOLDER = "n_update/"
36 #IMAGE_FOLDER = "no_handle_delay/"
37 IMAGE_FOLDER = "handle_delay/"
38 IMAGE_EXTENSION = "pdf"
39 SHOW_GPS = False
40
41 # Fusion flags
42 TAU_P = 0.5
43 TAU_V = 0.01
44 TAU_THETA = 0.0
45 FUSE_GPS = True
46 HANDLE_DELAYS = True
47 OUTPUT_CORRECTION = True
48
49
```

```

50  # Control se realiza sobre los estados reales para acotar más el efecto del estimador
51  def control_actuators(
52      theta: float, thetad: float, theta_ref: float, yd_e: float
53  ) -> [float, float]:
54      # Control gains
55      K_height = 2
56      K_tilt = 0.2
57      Kd_tilt = 0.1
58      thrust = MASS * G_CONSTANT / np.cos(theta) + yd_e * K_height
59      torque = (theta_ref - theta) * K_tilt - thetad * Kd_tilt
60      return thrust, torque
61
62
63
64  # Jacobianos de los modelos de observación
65  H_gps = np.zeros((2, 5))
66  H_gps[0, 0] = 1
67  H_gps[1, 1] = 1
68  R_gps = np.diag([GPS_NOISE ** 2, GPS_NOISE ** 2])
69
70  def output_filter(
71      p_prev, v_prev, theta_prev, accel, gyro
72  ) -> list:
73
74      if np.isnan(p_prev[0]):
75          # we need to initialize
76          p_prev = np.array([0,0])
77          v_prev = np.array([0,0])
78          theta_prev = 0
79
80          theta_pred = theta_prev + DT * gyro
81          c = np.cos(theta_prev)
82          s = np.sin(theta_prev)
83          rot_mat = np.array([[c, -s], [s, c]])
84          v_pred = v_prev + DT * rot_mat @ accel
85          p_pred = p_prev + DT * v_prev
86      return p_pred, v_pred, theta_pred
87
88
89  def ekf_estimator(
90      p_prev, v_prev, theta_prev, cov_mat_prev, accel, gyro, gps=None
91  ) -> list:
92
93      if gyro is None:
94          # we can't predict states without IMU measurements
95          return [None]*4
96
97      if np.isnan(p_prev[0]):
98          # we need to initialize
99          p_prev = np.array([0,0])
100         v_prev = np.array([0,0])
101         theta_prev = 0
102         cov_mat_prev = np.zeros([5,5])# TODO: esto está bien?
103
104     # Predicción de los estados
105     theta_pred = theta_prev + DT * gyro
106     c = np.cos(theta_prev)
107     s = np.sin(theta_prev)
108     rot_mat = np.array([[c, -s], [s, c]])
109     v_pred = v_prev + DT * rot_mat @ accel
110     p_pred = p_prev + DT * v_prev
111
112     # Predicción de la matriz de covarianzas
113     x_pred = np.array([p_pred[0], p_pred[1], v_pred[0], v_pred[1], theta_pred])
114     F = np.array(
115         [
116             [1, 0, DT, 0, 0],
117             [0, 1, 0, DT, 0],
118             [
119                 0,

```

```

120         0,
121         1,
122         0,
123     DT * (-accel[0] * np.sin(theta_prev) + accel[1] * np.cos(theta_prev)),
124     ],
125     [
126         0,
127         0,
128         0,
129         1,
130     DT * (-accel[0] * np.cos(theta_prev) - accel[1] * np.sin(theta_prev)),
131     ],
132     [0, 0, 0, 0, 1],
133   ]
134 )
135 G = np.array(
136   [
137     [0, 0, 0],
138     [0, 0, 0],
139     [DT * c, DT * s, 0],
140     [-DT * s, DT * c, 0],
141     [0, 0, DT],
142   ]
143 )
144 Q = (
145   G
146   @ np.diag([ACCEL_NOISE ** 2, ACCEL_NOISE ** 2, GYRO_NOISE ** 2])
147   @ np.transpose(G)
148 )
149 cov_mat_est = F @ cov_mat_prev @ np.transpose(F) + Q
150
151 x_est = x_pred
152 p_est = x_est[0:2] # Remind slices x:y doesn't include y
153 v_est = x_est[2:4]
154 theta_est = x_est[4]
155 cov_mat = cov_mat_est
156
157 ### Update
158
159 ## gps
160 if FUSE_GPS and not np.isnan(gps).any():
161     innov = gps - p_est
162     S_gps = H_gps @ cov_mat @ np.transpose(H_gps) + R_gps
163     K_f = cov_mat @ np.transpose(H_gps) @ np.linalg.inv(S_gps)
164     x_est = x_est + K_f @ innov
165     p_est = x_est[0:2]
166     v_est = x_est[2:4]
167     theta_est = x_est[4]
168     cov_mat = cov_mat - K_f @ H_gps @ cov_mat
169
170 return p_est, v_est, theta_est, cov_mat
171
172 def draw_animation(x, y, theta):
173     import numpy as np
174     import matplotlib.pyplot as plt
175     from matplotlib.animation import FuncAnimation
176
177     fig, ax = plt.subplots()
178     xdata, ydata = [], []
179     ln, = plt.plot([], [], "r")
180     ln2, = plt.plot([], [], "b")
181
182     def init():
183         margin = 2
184         ax.set_xlim(min(x) - margin, max(x) + margin)
185         ax.set_ylim(min(y) - margin, max(y) + margin)
186         ax.set_aspect("equal")
187         return (ln,)
188
189

```

```

190     def update(frame):
191         xdata.append(x[frame])
192         ydata.append(y[frame])
193         ln.set_data(xdata, ydata)
194         c = np.cos(theta[frame])
195         s = np.sin(theta[frame])
196         rot_mat = np.array([[c, -s], [s, c]])
197         p1 = [-0.5, 0]
198         p2 = [0.5, 0]
199         p1_rot = rot_mat @ p1
200         p2_rot = rot_mat @ p2
201         ln2.set_data(
202             [p1_rot[0], p2_rot[0]] + x[frame], [p1_rot[1], p2_rot[1]] + y[frame]
203         )
204     return ln, ln2
205
206 ani = FuncAnimation(
207     fig,
208     update,
209     frames=len(x),
210     init_func=init,
211     blit=True,
212     interval=DT * 1e3,
213     repeat=False,
214 )
215 plt.show()
216
217
218 def main():
219     print("-----")
220     print("Simulador quadrotor")
221     print("-----")
222
223     # Actuation signals
224     thrust = np.ones(DATA_L) * MASS * G_CONSTANT
225     torque = np.zeros(DATA_L)
226
227     # translational variables
228     a = np.zeros((2, DATA_L))
229     v = np.zeros((2, DATA_L))
230     p = np.zeros((2, DATA_L))
231
232     # angular variables. Initialized in zero
233     theta = np.zeros(DATA_L)
234     thetad = np.zeros(DATA_L)
235     thetadd = np.zeros(DATA_L)
236
237     # sensores
238     accel = np.zeros((2, DATA_L))
239     accel_gt = np.zeros((2, DATA_L))
240     gyro = np.zeros(DATA_L)
241     gps = np.empty((2, DATA_L)) * np.nan
242
243     # Setpoints
244     yd_ref = np.zeros(DATA_L)
245     theta_ref = np.zeros(DATA_L)
246     yd_ref[: int(DATA_L * 0.25)] = 2
247     theta_ref[int(DATA_L * 0.70) : int(DATA_L * 0.85)] = np.pi / 6
248     theta_ref[int(DATA_L * 0.85) :] = -np.pi / 6
249
250     t = np.array(list(range(DATA_L))) * DT
251
252     # Simulate 2 newton law
253     for i in range(1, DATA_L): # Pass states are needed, so we start at second
254         # Control actuators
255         thrust[i], torque[i] = control_actuators(
256             theta[i - 1], thetad[i - 1], theta_ref[i], yd_ref[i] - v[1, i - 1]
257         )
258
259         # Rotational dynamics

```

```

260     thetadd[i] = torque[i] / INERTIA
261     thetad[i] =
262         thetad[i - 1] + DT * thetadd[i]
263     ) # TODO: test trapezoidal integration
264     theta[i] = theta[i - 1] + DT * thetad[i]
265
266     # Rotation matrix. Transform body coordinates to inertial coordinates
267     c = np.cos(theta[i])
268     s = np.sin(theta[i])
269     rot_mat = np.array([[c, -s], [s, c]])
270
271     # Translational dynamics
272     thrust_rot = rot_mat @ np.array([0, thrust[i]])
273     gravity_force = np.array([0, -G_CONSTANT]) * MASS
274     a[:, i] = (thrust_rot + gravity_force) / MASS
275     v[:, i] = v[:, i - 1] + DT * a[:, i]
276     p[:, i] = p[:, i - 1] + DT * v[:, i]
277
278     # simulate sensors
279     accel_gt[:, i] = np.linalg.inv(rot_mat) @ a[:, i]
280     accel[:, i] =
281         accel_gt[:, i] + randn(2) * ACCEL_NOISE
282     )
283     gyro[i] = thetad[i] + randn(1) * GYRO_NOISE
284
285     if i > GPS_DELAY / DT:
286         gps[:, i] = p[:, int(i - GPS_DELAY / DT)] + randn(2) * GPS_NOISE
287     else:
288         gps[:, i] = None
289
290     if GPS_PERIOD!=0:
291         if i%(GPS_PERIOD/DT)!=0:
292             gps[:, i] = None
293
294
295     ### Estimación de los estados ###
296     # States at delayed time horizon
297     v_est = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
298     p_est = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
299     theta_est = np.empty(DATA_L)*np.nan
300
301     # States at current time horizon
302     v_output = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
303     p_output = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
304     theta_output = np.empty(DATA_L)*np.nan
305
306     # Output states delayed. Only for logging
307     v_output_del = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
308     p_output_del = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
309     theta_output_del = np.empty(DATA_L)*np.nan
310
311     # Corrección aplicada al filtro de salida
312     v_correction = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
313     p_correction = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
314     theta_correction = np.empty(DATA_L)*np.nan
315
316     # Matriz de covarianzas
317     P_est = np.empty((5, 5, DATA_L))*np.nan
318
319     # Buffer de medidas
320     max_delay = max(GPS_DELAY, 0)
321     buffer_size = int(max_delay / DT) + 1
322     buffer_ekf = [{}]*buffer_size
323     gps_insert_pos = int(GPS_DELAY / DT)
324
325     # Buffer de estados
326     buffer_output = [{}]*buffer_size
327
328     for i in range(1, DATA_L):
329

```

```

330     ## Fill buffer
331     # Sensors with no delay (pos 0)
332     buffer_ekf.insert(0, {"accel": accel[:, i], "gyro": gyro[i]}) 
333     # gps
334     buffer_ekf[gps_insert_pos]["gps"] = gps[:, i]
335
336     ## Pop buffer
337     delayed_meas = buffer_ekf.pop()
338     accel_delayed = (
339         delayed_meas["accel"] if "accel" in delayed_meas.keys() else None
340     )
341     gyro_delayed = delayed_meas["gyro"] if "gyro" in delayed_meas.keys() else None
342     gps_delayed = delayed_meas["gps"] if "gps" in delayed_meas.keys() else None
343
344     [p_est[:, i], v_est[:, i], theta_est[i], P_est[:, :, i]] = (
345         ekf_estimator(
346             p_est[:, i - 1],
347             v_est[:, i - 1],
348             theta_est[i - 1],
349             P_est[:, :, i - 1],
350             accel[:, i],
351             gyro[i],
352             gps=gps[:, i],
353         )
354         if not HANDLE_DELAYS
355         else ekf_estimator(
356             p_est[:, i - 1],
357             v_est[:, i - 1],
358             theta_est[i - 1],
359             P_est[:, :, i - 1],
360             accel_delayed,
361             gyro_delayed,
362             gps=gps_delayed,
363         )
364     )
365
366     ## Output filter
367     [p_output[:, i], v_output[:, i], theta_output[i]] = output_filter(
368         p_output[:, i - 1],
369         v_output[:, i - 1],
370         theta_output[i - 1],
371         accel[:, i],
372         gyro[i],
373     )
374     # Fill output buffer
375     buffer_output.insert(0, {"p": p_output[:, i], "v": v_output[:, i], "theta": theta_output[i]}
376     ↵ }
376
377     ## Corrección
378
379     # Pop buffer
380     delayed_state = buffer_output.pop()
381
382     if "p" in delayed_state.keys() and OUTPUT_CORRECTION:
383         p_delayed = delayed_state["p"]
384         v_delayed = delayed_state["v"]
385         theta_delayed = delayed_state["theta"]
386
387         p_error = p_est[:, i] - p_delayed
388         v_error = v_est[:, i] - v_delayed
389         theta_error = theta_est[i] - theta_delayed
390
391         for index, elem in enumerate(buffer_output):
392             # TODO: Test integral control
393             buffer_output[index]["p"] = buffer_output[index]["p"] + p_error* TAU_P
394             buffer_output[index]["v"] = buffer_output[index]["v"] + v_error* TAU_V
395             buffer_output[index]["theta"] = buffer_output[index]["theta"] + theta_error*
396             ↵ TAU_THETA
397
398             p_output[:, i] = buffer_output[0]["p"]
399             v_output[:, i] = buffer_output[0]["v"]

```

```

399     theta_output[i] = buffer_output[0]["theta"]
400
401     p_output_del[:,i] = p_delayed
402     v_output_del[:,i] = v_delayed
403     theta_output_del[i] = theta_delayed
404
405     p_correction[:,i] = p_error * TAU_P
406     v_correction[:,i] = v_error * TAU_V
407     theta_correction[i] = theta_error * TAU_THETA
408
409
410     # create result folders
411     if IMAGE_EXTENSION=="pdf":
412         results_path = IMAGE_FOLDER + os.sep
413     else:
414         subdir_name = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H-%M-%S")
415         results_path = IMAGE_FOLDER + subdir_name + os.sep
416
417     os.makedirs(results_path)
418
419     # save parameters
420     with open(results_path + "parametros.txt", "w") as f:
421         f.write(str(globals()))
422
423     # Activate global grid
424     plt.rcParams['axes.facecolor'] = 'white'
425     plt.rcParams['axes.edgecolor'] = 'white'
426     plt.rcParams['axes.grid'] = True
427     plt.rcParams['grid.alpha'] = 1
428     plt.rcParams['grid.color'] = "#cccccc"
429
430     plt.rcParams.update({'font.size': 16})
431     plt.rcParams.update({'font.weight': 'bold'})
432
433     matplotlib.rcParams['font.family'] = 'serif'
434     matplotlib.rcParams['font.serif'] = 'Computer Modern Roman'
435     matplotlib.rcParams["text.usetex"] = True
436
437     # Plot results
438     fig, ax = plt.subplots()
439     ax.set_title("Posición X")
440     if DRAW_ESTIMATED:
441         ax.plot(t, p_est[0, :], label="$P_x$ EKF", color="tab:orange")
442         if OUTPUT_CORRECTION:
443             ax.plot(t, p_output[0, :], label="$P_x$ Salida", color="tab:green")
444             if SHOW_OUTPUT_CORRECTION:
445                 ax.plot(t, p_correction[0, :], label="$P_x$ correction")
446             if SHOW_OUTPUT_DELAYED:
447                 ax.plot(t, p_output_del[0, :], label="$P_x$ output delayed", color="tab:purple",
448                         linestyle="--")
449             if SHOW_GPS:
450                 ax.scatter(t, gps[0, :], label="$P_x$ GPS", marker="x", color="tab:green")
451                 ax.plot(t, p[0, :], label="$P_x$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
452                 plt.xlabel("t (s)")
453                 plt.ylabel("$P_x$ (m)")
454                 ax.legend()
455                 plt.savefig(results_path + "x_t." + IMAGE_EXTENSION)
456
457     fig, ax = plt.subplots()
458     ax.set_title("Posición Y")
459     if DRAW_ESTIMATED:
460         ax.plot(t, p_est[1, :], label="$P_y$ EKF", color="tab:orange")
461         if OUTPUT_CORRECTION:
462             ax.plot(t, p_output[1, :], label="$P_y$ Salida", color="tab:green")
463             if SHOW_OUTPUT_CORRECTION:
464                 ax.plot(t, p_correction[1, :], label="$P_y$ correction")
465             if SHOW_OUTPUT_DELAYED:
466                 ax.plot(t, p_output_del[1, :], label="$P_y$ output delayed", color="tab:purple",
467                         linestyle="--")
468             if SHOW_GPS:
469                 ax.scatter(t, gps[1, :], label="$P_y$ GPS", marker="x", color="tab:green")

```

```

468 ax.plot(t, p[1, :], label="$P_y$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
469 plt.xlabel("t (s)")
470 plt.ylabel("$P_y$ (m)")
471 ax.legend()
472 plt.savefig(results_path + "y_t." + IMAGE_EXTENSION)
473
474 fig, ax = plt.subplots()
475 ax.set_title("Y vs X")
476 if DRAW_ESTIMATED:
477     ax.plot(p_est[0, :], p_est[1, :], label="$P$ EKF", color="tab:orange")
478     if OUTPUT_CORRECTION:
479         ax.plot(p_output[0, :], p_output[1, :], label="$P$ Salida", color="tab:green")
480 if SHOW_GPS:
481     ax.scatter(gps[0, :], gps[1, :], label="$P$ GPS", marker="x", color="tab:green")
482 ax.plot(p[0, :], p[1, :], label="$P$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
483 plt.xlabel("$P_x$ (m)")
484 plt.ylabel("$P_y$ (m)")
485 ax.legend()
486 ax.set_aspect("equal")
487 plt.savefig(results_path + "tray." + IMAGE_EXTENSION)
488
489 fig, ax = plt.subplots()
490 ax.set_title("Velocidad X")
491 if DRAW_ESTIMATED:
492     ax.plot(t, v_est[0, :], label="$V_x$ EKF", color="tab:orange")
493     if OUTPUT_CORRECTION:
494         ax.plot(t, v_output[0, :], label="$V_x$ Salida", color="tab:green")
495         if SHOW_OUTPUT_CORRECTION:
496             ax.plot(t, v_correction[0, :], label="$V_x$ correction")
497         if SHOW_OUTPUT_DELAYED:
498             ax.plot(t, v_output_del[0, :], label="$V_x$ output delayed", color="tab:purple",
499                     linestyle="--")
500     ax.plot(t, v[0, :], label="$V_x$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
501 plt.xlabel("t (s)")
502 plt.ylabel("$V$ (m/s)")
503 ax.legend()
504 plt.savefig(results_path + "Vx." + IMAGE_EXTENSION)
505
506 fig, ax = plt.subplots()
507 ax.set_title("Velocidad Y")
508 if DRAW_ESTIMATED:
509     ax.plot(t, v_est[1, :], label="$V_y$ EKF", color="tab:orange")
510     if OUTPUT_CORRECTION:
511         ax.plot(t, v_output[1, :], label="$V_y$ Salida", color="tab:green")
512         if SHOW_OUTPUT_CORRECTION:
513             ax.plot(t, v_correction[1, :], label="$V_y$ correction")
514         if SHOW_OUTPUT_DELAYED:
515             ax.plot(t, v_output_del[1, :], label="$V_y$ output delayed", color="tab:purple",
516                     linestyle="--")
516     ax.plot(t, v[1, :], label="$V_y$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
517 plt.xlabel("t (s)")
518 plt.ylabel("$V$ (m/s)")
519 ax.legend()
520 plt.savefig(results_path + "Vy." + IMAGE_EXTENSION)
521
522 fig, ax = plt.subplots()
523 ax.set_title("Inclinación")
524 if DRAW_ESTIMATED:
525     ax.plot(t, theta_est*180/np.pi, label=r"$\theta$ EKF", color="tab:orange")
526     if OUTPUT_CORRECTION:
527         ax.plot(t, theta_output*180/np.pi, label=r"$\theta$ Salida", color="tab:green")
528         if SHOW_OUTPUT_CORRECTION:
529             ax.plot(t, theta_correction*180/np.pi, label=r"$\theta$ correction",
530                     color="tab:purple", linestyle="--")
531         if SHOW_OUTPUT_DELAYED:
532             ax.plot(t, theta_output_del*180/np.pi, label=r"$\theta$ output delayed",
533                     color="tab:purple", linestyle="--")
533     ax.plot(t, theta*180/np.pi, label=r"$\theta$ Groundtruth", color="tab:blue", linestyle="--")
534 plt.xlabel("t (s)")
535 plt.ylabel(r"$\theta$ (\textdegree)")
536 ax.legend()

```

```

535 plt.savefig(results_path + "theta." + IMAGE_EXTENSION)
536
537
538 # Sensors
539 fig, ax = plt.subplots()
540 ax.set_title("Acelerómetro")
541 ax.plot(
542     t, accel_gt[0, :], color="tab:orange", label="$a_x$ Groundtruth", linestyle="--"
543 )
544 ax.plot(
545     t, accel_gt[1, :], color="tab:blue", label="$a_y$ Groundtruth", linestyle="--"
546 )
547 ax.plot(t, accel[0, :], color="tab:orange", label="$a_x$ measure")
548 ax.plot(t, accel[1, :], color="tab:blue", label="$a_y$ measure")
549 plt.xlabel("t (s)")
550 plt.ylabel("a (m/s)")
551 ax.legend()
552 plt.savefig(results_path + "accel." + IMAGE_EXTENSION)
553
554 fig, ax = plt.subplots()
555 ax.set_title(r"Giroscopo ($\omega$)")
556 ax.plot(t, thetad, label="Groundtruth")
557 ax.plot(t, gyro, label="measure")
558 plt.xlabel("t (s)")
559 plt.ylabel(r"$\omega$ (rad/s)")
560 ax.legend()
561 plt.savefig(results_path + "gyro." + IMAGE_EXTENSION)
562
563
564 # Errors
565 p_groundtruth_del = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
566 v_groundtruth_del = np.empty((2, DATA_L))*np.nan
567 theta_groundtruth_del = np.empty(DATA_L)*np.nan
568 p_groundtruth_del[0, :] = shift(p[0, :], buffer_size, cval=np.NaN)
569 p_groundtruth_del[1, :] = shift(p[1, :], buffer_size, cval=np.NaN)
570 v_groundtruth_del = shift(v, buffer_size, cval=np.NaN)
571 theta_groundtruth_del = shift(v, buffer_size, cval=np.NaN)
572
573 fig, ax = plt.subplots()
574 ax.set_title("Error de velocidad")
575 ax.plot(t, np.sqrt(P_est[2, 2, :]), color="tab:orange", label=r"$\sigma_{V_x}$", linestyle="--")
576 ax.plot(t, np.sqrt(P_est[3, 3, :]), color="tab:blue", label=r"$\sigma_{V_y}$", linestyle="--")
577 if SHOW_OUTPUT_ERROR and OUTPUT_CORRECTION:
578     ax.plot(t, abs(v[0, :]-v_output[0, :]), color="tab:orange", label="Error $V_x$ Salida")
579     ax.plot(t, abs(v[1, :]-v_output[1, :]), color="tab:blue", label="Error $V_y$ Salida")
580 else:
581     ax.plot(t, abs(v[0, :]-v_est[0, :]), color="tab:orange", label="Error $V_x$ EKF")
582     ax.plot(t, abs(v[1, :]-v_est[1, :]), color="tab:blue", label="Error $V_y$ EKF")
583 plt.xlabel("t (s)")
584 plt.ylabel("error (m/s)")
585 ax.legend()
586 plt.savefig(results_path + "V_error." + IMAGE_EXTENSION)
587
588 fig, ax = plt.subplots()
589 ax.set_title("Error de posición en X")
590 ax.plot(t, np.sqrt(P_est[0, 0, :]), color="tab:orange", label=r"$\sigma(P_x)$")
591 if OUTPUT_CORRECTION:
592     if SHOW_OUTPUT_ERROR:
593         ax.plot(t, abs(p[0, :]-p_output[0, :]), color="tab:green", label="Error $P_x$ Salida")
594         ax.plot(t, abs(p_groundtruth_del[0, :]-p_est[0, :]), color="tab:blue", label="Error $P_x$ → EKF")
595     else:
596         ax.plot(t, abs(p[0, :]-p_est[0, :]), color="tab:blue", label="Error $P_x$ EKF")
597 plt.xlabel("t (s)")
598 plt.ylabel("error (m)")
599 ax.legend()
600 plt.savefig(results_path + "Px_error." + IMAGE_EXTENSION)
601
602
603 fig, ax = plt.subplots()
604 ax.set_title("Error de posición en Y")

```

```

605     ax.plot(t, np.sqrt(P_est[1, 1, :]), color="tab:orange", label=r"\sigma(P_y)")
606     if OUTPUT_CORRECTION:
607         if SHOW_OUTPUT_ERROR:
608             ax.plot(t, abs(p[1, :]-p_output[1, :]), color="tab:green", label="Error $P_y$ Salida")
609             ax.plot(t, abs(p_groundtruth_del[1, :]-p_est[1, :]), color="tab:blue", label="Error $P_y$"
610             ↪ EKF")
611         else:
612             ax.plot(t, abs(p[1, :]-p_est[1, :]), color="tab:blue", label="Error $P_y$ EKF")
613     plt.xlabel("t (s)")
614     plt.ylabel("error (m)")
615     ax.legend()
616     plt.savefig(results_path + "Py_error." + IMAGE_EXTENSION)
617
618     fig, ax = plt.subplots()
619     ax.set_title("Error de inclinación")
620     ax.plot(t, np.sqrt(P_est[4, 4, :]), label=r"\sigma\theta$")
621     if SHOW_OUTPUT_ERROR and OUTPUT_CORRECTION:
622         ax.plot(t, abs(theta-theta_output), label=r"Error $\theta$ Salida")
623     else:
624         ax.plot(t, abs(theta-theta_est), label=r"Error $\theta$ EKF")
625     plt.xlabel("t (s)")
626     plt.ylabel("error (rad)")
627     ax.legend()
628     plt.savefig(results_path + "theta_error." + IMAGE_EXTENSION)
629
630     fig, ax = plt.subplots()
631     ax.set_title("Matriz de covarianzas") # Es diagonal
632     ax.plot(t, P_est[0, 1, :], label="$P_{est}[0,1]")
633     ax.plot(t, P_est[0, 2, :], label="$P_{est}[0,2]")
634     ax.plot(t, P_est[0, 3, :], label="$P_{est}[0,3]")
635     ax.plot(t, P_est[0, 4, :], label="$P_{est}[0,4]")
636     ax.plot(t, P_est[1, 2, :], label="$P_{est}[1,2]")
637     ax.plot(t, P_est[1, 3, :], label="$P_{est}[1,3]")
638     ax.plot(t, P_est[1, 4, :], label="$P_{est}[1,4]")
639     ax.plot(t, P_est[2, 3, :], label="$P_{est}[2,3]")
640     ax.plot(t, P_est[2, 4, :], label="$P_{est}[2,4]")
641     ax.plot(t, P_est[3, 4, :], label="$P_{est}[3,4]")
642     ax.plot(t, P_est[0, 0, :], label="$P_x$", linestyle="--")
643     ax.plot(t, P_est[1, 1, :], label="$P_y$", linestyle="--")
644     ax.plot(t, P_est[2, 2, :], label="$V_x$", linestyle="--")
645     ax.plot(t, P_est[3, 3, :], label="$V_y$", linestyle="--")
646     plt.xlabel("$t$ (s)")
647     ax.legend()
648     plt.savefig(results_path + "P_est." + IMAGE_EXTENSION)
649
650     if SHOW_PLOTS:
651         plt.show()
652
653     if SHOW_ANIMATED:
654         draw_animation(p[0, :], p[1, :], theta)
655
656 if __name__ == "__main__":
657     main()

```

Apéndice B

Detector de marcadores visuales

Los siguientes archivos se encuentran también en https://github.com/isidroas/rpi_vision_uav

B.1 main.cpp

```
1  /* mavsdk header */
2  #include <chrono>
3  #include <cmath>
4  #include <future>
5  #include <iostream>
6  #include <fstream>
7  #include <thread>
8  #include <unistd.h>
9  #include <Eigen/Dense>
10 #include "marker_vision.h"
11 #include "mavlink_helper.h"
12
13 using std::chrono::milliseconds;
14 using std::chrono::seconds;
15 using std::this_thread::sleep_for;
16
17 using namespace std;
18
19 #define TELEMETRY_CONSOLE_TEXT "\033[34m" // Turn text on console blue
20
21
22 #define DEBUG
23
24
25 #define UPDATE_DEBUG_RATE 30 // Cada cuantas iteraciones se calculan e imprimen las estadísticas
26
27 static bool readParameters(string filename, bool &mav_connect, bool &log_file, int &loop_period_ms,
28   → bool &wait_key, int &wait_key_mill) {
29   FileStorage fs(filename, FileStorage::READ);
30   if(!fs.isOpened())
31     return false;
32   mav_connect = (string)fs["mav_connect"]=="true";
33   log_file = (string)fs["log_file"]=="true";
34   loop_period_ms = (int)fs["loop_period_ms"];
35   wait_key_mill = (int)fs["wait_key_mill"];
36   wait_key = (string)fs["wait_key"]=="true";
37   cout << "Parámetros generales:" << endl;
38   cout << "\tConexión mavlink:\t\t\t" << mav_connect << endl;
39   cout << "\tLog de medidas:\t\t\t\t" << log_file << endl;
40   cout << "\tPeriodo mínimo de actualización:\t" << loop_period_ms << endl;
41   if (wait_key){
42     cout << "\tEspera a la presión de una tecla:\t" << wait_key_mill << endl;
43   }
44   cout << endl;
45   return true;
}
```

```

46
47
48
49 int main()
50 {
51     cout << "-----" << endl;
52     cout << "-----Vision position estimator-----" << endl;
53     cout << "-----" << endl;
54     cout << endl;
55
56     /* Startup python script for logging */
57     int res=system("python3 ..//python_scripts/startup.py");
58     if (res!=0){
59         cout << "El script de inicio ha fallado con código " << res << endl;
60         exit(1);
61     }
62
63     bool mav_connect, log_file, wait_key;
64     int loop_period_ms, wait_key_mill;
65     readParameters("../vision_params.yml", mav_connect, log_file, loop_period_ms, wait_key,
66     ↵ wait_key_mill);
67
68     CommunicationClass commObj;
69     if (mav_connect)
70         commObj.init();
71
72     double total_time = 0;
73     int totalIterations = 0;
74     auto wake_up_time = std::chrono::steady_clock::now() +
75     ↵ std::chrono::milliseconds(loop_period_ms);
76     double tick_global_ant = (double)getTickCount();
77     Eigen::Vector3d pos, euler_angles ;
78
79     double seconds_init = (double)getTickCount()/getTickFrequency();
80
81     //TODO: transladar estos parámetros al archivo.
82     bool vision_activated=true;
83
84     VisionClass visionMarker;
85     if (vision_activated)
86         visionMarker.init();
87
88     std::ofstream myfile;
89     if (log_file){
90         myfile.open("../results/latest/log.csv");
91         myfile << "px" << "," << "py" << "," << "pz" << "," << "roll" << "," << "pitch" << "," <<
92         ↵ "yaw" << "," << "t" <<"\n";
93     }
94
95     /*** Main Loop ***/
96     while(true){
97
98         if (vision_activated){
99             // Grab image and exists if there is no one
100            if (!visionMarker.grab_and_retrieve_image()) break;
101            // detect markers
102            bool found_marker = visionMarker.detect_marker(pos, euler_angles);
103
104            if (found_marker){
105                if (mav_connect)
106                    commObj.send_msg(pos, euler_angles);
107            }
108        }
109
110        #ifdef DEBUG
111        // Update counters
112        double tick_global_act = (double)getTickCount();
113        double execution_time = (tick_global_act - tick_global_ant) / getTickFrequency();

```

```

114     tick_global_ant = tick_global_act;
115     total_time += execution_time;
116     totalIterations++;
117
118     /* Print data every 30 frames = 1 seg approx*/
119     if(totalIterations % UPDATE_DEBUG_RATE == 0) {
120         cout << "Execution time = " << execution_time * 1000 << " ms "
121             << "(Mean = " << 1000 * total_time / float(UPDATE_DEBUG_RATE) << " ms)" << endl;
122         if (vision_activated)
123             visionMarker.print_statistics(pos, euler_angles);
124         total_time=0;
125         cout << endl;
126     }
127 #endif
128
129
130     if (log_file){
131         double seconds = getTickCount() / getTickFrequency() - seconds_init;
132         myfile << pos[0] << "," << pos[1] << "," << pos[2] << "," << euler_angles[0] << ","
133             << euler_angles[1] << "," << euler_angles[2] << "," << seconds << "\n";
134     }
135
136     if (loop_period_ms!=0){
137         std::this_thread::sleep_until(wake_up_time);
138         wake_up_time = std::chrono::steady_clock::now() +
139             std::chrono::milliseconds(loop_period_ms);
140     }
141
142     if (wait_key){
143         int key = waitKey( wait_key_mill );
144         if(key == 27) break; // exits if esc is pressed in window
145     }
146
147     if (log_file)
148         myfile.close();
149
150     res=system("python3 ./python_scripts/shutdown.py");
151     if (res!=0){
152         cout << "El script de apagado ha fallado con código " << res << endl;
153         exit(1);
154     }
155     std::cout << "Finished..." << std::endl;
156     return EXIT_SUCCESS;
157 }
```

B.2 vision_params.yml

```

1  YAML:1.0
2  #dict_type: 10    # 6x6 256
3  dict_type: 0    # 6x6 256
4
5  ## Single marker
6  #marker_length: 0.179
7  marker_length: 0.2335
8
9  ## Diamond
10 diamond: false
11 # autoscale not implemented yet
12 autoScale: false
13
14 ## Charuco
15 charuco: true
16 refindStrategy: true
17 # Charuco Boards
18 squaresX: 5
```

```
19 squaresY: 7
20 squareLength: 0.0475
21 markerLength: 0.0285
22 #squareLength: 0.0471
23 #markerLength: 0.0282
24
25
26 ## Camera
27 exposure_time: 20
28 # if fps>40, fov decreases
29 fps: 40
30 video_file: "../videos/vuelo_foco.h264"
31 frame_width: 640
32 frame_height: 480
33 #frame_width: 1280
34 #frame_height: 720
35 camera_parameters: "../calibration/rpi_v2_camera/cal.yml"
36 #camera_parameters: "../calibration/hp_camera/cal.yml"
37
38
39 ## General parameters
40 mav_connect: true
41 loop_period_ms: 0
42 open_window: true
43 wait_key_mill: 1
44 #TODO: this is mandatory when open_window=true
45 wait_key: true
46 show_rejected: false
47
48 ## Logging
49 write_images: true
50 log_file: true
51 generate_video_from_images: false
```

B.3 marker_vision.h

```
1 #include <opencv2/highgui.hpp>
2 #include <opencv2/aruco.hpp>
3 #include <opencv2/aruco/charuco.hpp>
4 #include <opencv2/calib3d.hpp>
5 #include <opencv2/core/eigen.hpp>
6 #include <unistd.h> // for sleep
7 using namespace cv;
8 using namespace std;
9
10 // Estas funciones se han escrito con la ayuda de los ejemplos
11 // -
12 // → https://github.com/opencv/opencv_contrib/blob/master/modules/aruco/samples/detect_markers.cpp
13 // -
14 // → https://github.com/opencv/opencv_contrib/blob/master/modules/aruco/samples/detect_board_charuco.cpp
15
16 //##define WAIT_KEY_MILL      1 // tiempo de espera entre fotogramas cuando se abre la ventana, si
17 // → vale 0, solo avanza cuando se presiona alguna tecla
18 #define AUTO_SCALE_FACTOR 1
19
20 //##define ROT_POS_ORI
21
22 class VisionClass {
23     public:
24         void init(){
25             int grab_and_retrieve_image(){
26                 double tick0 = (double)getTickCount();
27                 int res = inputVideo.grab();
28                 inputVideo.retrieve(image);
29                 double tick1 = (double)getTickCount();
30                 execution_time_video_grab_and_ret = (tick1-tick0) / getTickFrequency();
```

```

28         return res;
29     }
30     bool detect_marker(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul);
31     void print_statistics(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul);
32
33     private:
34     bool readDetectorParameters(string filename, Ptr<aruco::DetectorParameters> &params);
35     bool readVisionParameters(string filename);
36     void InvertPose(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul, Vec3d &rvec, Vec3d &tvec);
37     bool readCameraParameters(string filename, Mat &camMatrix, Mat &distCoeffs);
38     Eigen::Vector3d rotationMatrixToEulerAngles(Eigen::Matrix3d &R);
39
40     Mat image;
41     Mat imageCopy;
42     VideoCapture inputVideo;
43     Ptr<aruco::Dictionary> dictionary;
44     Ptr<aruco::DetectorParameters> detectorParams;
45     Mat camMatrix;
46     Mat distCoeffs;
47     string calibration_file;
48     string video_file;
49     bool show_rejected;
50     float marker_length;
51     int dict_type;
52     float axisLength;
53     bool open_window;
54     bool write_images;
55     // camera config
56     int exposure_time;
57     int fps;
58     int frame_width;
59     int frame_height;
60     // diamond specific
61     bool diamond;
62     bool autoScale;
63     // charuco specific
64     bool charuco;
65     bool refindStrategy;
66     int squaresX;
67     int squaresY;
68     float square_length;
69     float marker_length_ch;
70     Ptr<aruco::CharucoBoard> charucoboard;
71     Ptr<aruco::Board> board;
72     // logging
73     int totalIterations=0;
74     double execution_time_video_grab_and_ret;
75     double execution_time_detect;
76     double n_position_get=0;
77     double n_since_call_statistics=0;
78     double valid_pose;
79
80 };
81
82
83 // Calculates rotation matrix to euler angles
84 Eigen::Vector3d VisionClass::rotationMatrixToEulerAngles(Eigen::Matrix3d &R)
85 {
86
87     float sy = sqrt(R(0,0) * R(0,0) + R(1,0) * R(1,0) );
88
89     bool singular = sy < 1e-6; // If
90
91     float x, y, z;
92     if (!singular)
93     {
94         x = atan2(R(2,1) , R(2,2));
95         y = atan2(-R(2,0), sy);
96         z = atan2(R(1,0), R(0,0));
97     }
98     else

```

```

99
100    {
101        x = atan2(-R(1,2), R(1,1));
102        y = atan2(-R(2,0), sy);
103        z = 0;
104    }
105    return Eigen::Vector3d(x, y, z);
106}
107
108 bool VisionClass::readCameraParameters(string filename, Mat &camMatrix, Mat &distCoeffs) {
109     FileStorage fs(filename, FileStorage::READ);
110     if(!fs.isOpened())
111         return false;
112     fs["camera_matrix"] >> camMatrix;
113     fs["distortion_coefficients"] >> distCoeffs;
114     return true;
115 }
116
117
118 bool VisionClass::detect_marker(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul){
119     double tick0 = (double)getTickCount();
120
121     vector< int > ids, charucoIds;
122     vector< vector< Point2f > > corners, rejected;
123     vector< Vec3d > rvecs, tvecs;
124     Vec3d rvec, tvec;
125     vector< Point2f > charucoCorners;
126     vector< vector< Point2f > > diamondCorners;
127     vector< Vec4i > diamondIds;
128
129
130     aruco::detectMarkers(image, dictionary, corners, ids, detectorParams, rejected);
131
132     bool found_marker=ids.size() > 0;
133     valid_pose = false;
134     int interpolatedCorners = 0;
135
136     if (charuco){
137         if(refindStrategy)
138             aruco::refineDetectedMarkers(image, board, corners, ids, rejected,
139                                         camMatrix, distCoeffs);
140
141         // interpolate charuco corners
142         if(found_marker)
143             interpolatedCorners =
144                 aruco::interpolateCornersCharuco(corners, ids, image, charucoboard,
145                                                 charucoCorners, charucoIds, camMatrix,
146                                                 & distCoeffs);
147
148         if ((int)ids.size()==17){
149             // estimate charuco board pose
150             valid_pose = aruco::estimatePoseCharucoBoard(charucoCorners, charucoIds, charucoboard,
151                                               camMatrix, distCoeffs, rvec, tvec);
152         }
153         else{
154             valid_pose= false;
155         }
156     }
157     else if (diamond){
158         if (found_marker){
159             aruco::detectCharucoDiamond(image, corners, ids,
160                                         square_length / marker_length_ch, diamondCorners,
161                                         & diamondIds,
162                                         camMatrix, distCoeffs);
163
164             if(!autoScale) {
165                 aruco::estimatePoseSingleMarkers(diamondCorners, square_length, camMatrix,
166                                             distCoeffs, rvecs, tvecs);
167             } else {
168                 // if autoscale, extract square size from last diamond id
169                 //for(unsigned int i = 0; i < diamondCorners.size(); i++) {
170                 //    float autoSquareLength = AUTO_SCALE_FACTOR * float(diamondIds[i].val[3]);
171             }
172         }
173     }
174 }
```

```

168     //    vector< vector< Point2f > > currentCorners;
169     //    vector< Vec3d > currentRvec, currentTvec;
170     //    currentCorners.push_back(diamondCorners[i]);
171     //    aruco::estimatePoseSingleMarkers(currentCorners, autoSquareLength,
172     //        camMatrix,
173     //        distCoeffs, currentRvec, currentTvec);
174     //    rvecs.push_back(currentRvec[0]);
175     //    tvecs.push_back(currentTvec[0]);
176     //}
177     cout << "Autoscale todavía no implementado" << endl;
178     exit(0);
179 }
180 if (tvecs.size()>0){
181     rvec=rvecs[0];
182     tvec=tvecs[0];
183     valid_pose= true;
184 }
185 }
186 else{
187     if(found_marker){
188         aruco::estimatePoseSingleMarkers(corners, marker_length, camMatrix, distCoeffs, rvecs,
189             &tvecs);
190         valid_pose = true;
191         rvec=rvecs[0];
192         tvec=tvecs[0];
193     }
194 }
195
196 if (open_window){
197     image.copyTo(imageCopy);
198
199     if(found_marker){
200         aruco::drawDetectedMarkers(imageCopy, corners, ids);
201     }
202     if(interpolatedCorners > 0) {
203         Scalar color;
204         color = Scalar(255, 0, 0);
205         aruco::drawDetectedCornersCharuco(imageCopy, charucoCorners, charucoIds, color);
206     }
207     if (valid_pose){
208         aruco::drawAxis(imageCopy, camMatrix, distCoeffs, rvec, tvec, axisLength);
209     }
210
211     if(show_rejected && rejected.size() > 0)
212         aruco::drawDetectedMarkers(imageCopy, rejected, noArray(), Scalar(100, 0, 255));
213
214     imshow("out", imageCopy);
215     if (write_images){
216         char path [100];
217         sprintf(path,"..../results/latest/images/image%d.png", totalIterations);
218         imwrite(path,imageCopy);
219     }
220 //    waitKey( WAIT_KEY_MILL );
221 }
222
223 if (valid_pose){
224     InvertPose(pos, eul, rvec, tvec);
225 }
226 else{
227     pos[0]=pos[1]=pos[2]=NAN;
228     eul[0]=eul[1]=eul[2]=NAN;
229 }
230
231 totalIterations++;
232
233 double tick1 = (double)getTickCount();
234
235 execution_time_detect = (tick1-tick0) / getTickFrequency();

```

```

237     n_since_call_statistics++;
238     if (valid_pose)
239         n_position_get++;
240
241     return valid_pose;
242 }
243

```

La siguiente función invierte la posición y la rotación. También corrige la posición de la cámara con respecto al UAV. Sus argumentos son:

- rvec. Vector de entrada. Vector de rotación del marcador con respecto a los ejes de la cámara
- tvec. Vector de entrada. Translación del marcador con respecto a los ejes de la cámara
- pos. Vector de salida. Posición del uav/cámara con respecto al marcador
- eul. Vector de salida. Orientación del uav con respecto al marcador. El orden de los elementos son 0: roll, 1: pitch, 2: yaw

```

250 void VisionClass::InvertPose(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul, Vec3d &rvec, Vec3d
251   ↵ &tvec){///
252
253     Eigen::Vector3d      pos_marker_in_camera(tvec[0],tvec[1],tvec[2]);
254
255     // Transformación de vector de rotación a matriz de rotación
256     cv::Mat               rot_mat;
257     Eigen::Matrix3d       rot_mat_marker_from_camera;
258     Rodrigues(rvec,rot_mat);
259     cv::cv2eigen(rot_mat, rot_mat_marker_from_camera);
260
261     // La inversa de una matriz de rotación es igual a su traspuesta
262     Eigen::Matrix3d       rot_mat_camera_from_marker = rot_mat_marker_from_camera.transpose() ;
263
264     // Se obtiene la posición del marcador en unos ejes paralelos al marcador centrados en la
265     ↵ cámara
266     Eigen::Vector3d      pos_marker_in_marker_axis =
267     ↵ rot_mat_camera_from_marker*pos_marker_in_camera;
268
269     // Si queremos que la posición esté centrada en el marcador y no en la cámara, es necesario
270     ↵ negarla
271     pos = -pos_marker_in_marker_axis;
272
273     // Aquí debemos de tener en cuenta la rotación de la cámara con respecto al uav. Esta es de
274     ↵ 180º alrededor del eje z.
275     // Queremos rotar en ejes absolutos y no en los ejes de rot_mat_marker_from_camera, por lo
276     ↵ tanto premultiplicamos.
277     Eigen::Matrix3d       rot_mat_camera_from_uav;
278     rot_mat_camera_from_uav << -1, 0, 0,
279                           0, -1, 0,
280                           0, 0, 1;
281     Eigen::Matrix3d       rot_mat_marker_from_uav = rot_mat_camera_from_uav *
282     ↵ rot_mat_marker_from_camera;
283
284     // Se obtiene la orientación del uav visto desde el marcador
285     Eigen::Matrix3d       rot_mat_uav_from_marker = rot_mat_marker_from_uav.transpose() ;
286
287     // Se obtiene los ángulos de Tait-Bryan en el orden Z-Y-X (ángulos de euler)
288     eul = rotationMatrixToEulerAngles(rot_mat_uav_from_marker);
289
290     #ifdef ROT_POS_ORI
291     // Transformaciones después de invertir la posición y la orientación. Queremos que la posición
292     ↵ y la orientación del UAV
293     // esté expresado en un sistema de referencia con su eje z apuntando hacia abajo. El del
294     ↵ marcador apunta hacia arriba, así
295     // que se rotará 180º en el eje x
296     Eigen::Matrix3d       rot_mat_marker_from_NED;
297     rot_mat_marker_from_NED << 1, 0, 0,

```

```

289          0, -1, 0,
290          0, 0, -1;
291 Eigen::Matrix3d rot_mat_uav_from_NED = rot_mat_marker_from_NED *
292     ↳ rot_mat_uav_from_marker;
293
294 eul = rotationMatrixToEulerAngles(rot_mat_uav_from_NED);
295 pos = rot_mat_marker_from_NED * -pos_marker_in_marker_axis;
296 #endif
297 }
298
299 bool VisionClass::readVisionParameters(string filename) {
300     FileStorage fs(filename, FileStorage::READ);
301     if(!fs.isOpened())
302         return false;
303
304     fs["camera_parameters"] >> calibration_file;
305     fs["video_file"] >> video_file;
306     open_window = (string)fs["open_window"]=="true";
307     show_rejected = (string)fs["show_rejected"]=="true";
308     charuco = (string)fs["charuco"]=="true";
309     refindStrategy = (string)fs["refindStrategy"]=="true";
310     marker_length = (float)fs["marker_length"];
311     dict_type = (int)fs["dict_type"];
312     exposure_time = (int)fs["exposure_time"];
313     fps = (int)fs["fps"];
314     squaresX = (int)fs["squaresX"];
315     squaresY = (int)fs["squaresY"];
316     marker_length_ch = (float)fs["markerLength"];
317     square_length = (float)fs["squareLength"];
318     squaresY = (int)fs["squaresY"];
319     frame_height = (int)fs["frame_height"];
320     frame_width = (int)fs["frame_width"];
321     diamond = (string)fs["diamond"]=="true";
322     autoScale = (string)fs["autoScale"]=="true";
323     write_images = (string)fs["write_images"]=="true";
324
325     // Print them
326     cout << "Parámetros de la visión:" << endl;
327     cout << "\tEl fichero de calibracion es:\t" << calibration_file << endl;
328     cout << "\tArchivo de video:\t\t" << video_file << endl;
329     cout << "\tActivación de la ventana:\t" << open_window << endl;
330     cout << "\tMostrar rechazados:\t\t" << show_rejected << endl;
331     cout << "\tTamaño del marcador:\t\t" << marker_length << endl;
332     cout << "\tTipo de diccionario:\t\t" << dict_type << endl;
333     cout << "\tTiempo de exposición:\t\t" << exposure_time << endl;
334     cout << "\tFPS:\t\t\t" << fps << endl;
335     if (charuco){
336         cout << endl;
337         cout << "Charuco:" << endl;
338         cout << "\trefindStrategy:\t\t" << refindStrategy << endl;
339         cout << "\tmarkerLength:\t\t" << marker_length_ch << endl;
340         cout << "\tsquareLength:\t\t" << square_length << endl;
341         cout << "\tsquaresX:\t\t" << squaresX << endl;
342         cout << "\tsquaresY:\t\t" << squaresY << endl;
343     }
344     else if(diamond){
345         cout << endl;
346         cout << "Diamond:" << endl;
347         cout << "\tautoScale:\t\t" << autoScale << endl;
348     }
349
350     cout << endl;
351     return true;
352 }
353
354 bool VisionClass::readDetectorParameters(string filename, Ptr<aruco::DetectorParameters> &params) {
355     FileStorage fs(filename, FileStorage::READ);
356     if(!fs.isOpened())
357         return false;
358     fs["adaptiveThreshWinSizeMin"] >> params->adaptiveThreshWinSizeMin;

```

```

359     fs["adaptiveThreshWinSizeMax"] >> params->adaptiveThreshWinSizeMax;
360     fs["adaptiveThreshWinSizeStep"] >> params->adaptiveThreshWinSizeStep;
361     fs["adaptiveThreshConstant"] >> params->adaptiveThreshConstant;
362     fs["minMarkerPerimeterRate"] >> params->minMarkerPerimeterRate;
363     fs["maxMarkerPerimeterRate"] >> params->maxMarkerPerimeterRate;
364     fs["polygonalApproxAccuracyRate"] >> params->polygonalApproxAccuracyRate;
365     fs["minCornerDistanceRate"] >> params->minCornerDistanceRate;
366     fs["minDistanceToBorder"] >> params->minDistanceToBorder;
367     fs["minMarkerDistanceRate"] >> params->minMarkerDistanceRate;
368     fs["cornerRefinementMethod"] >> params->cornerRefinementMethod;
369     fs["cornerRefinementWinSize"] >> params->cornerRefinementWinSize;
370     fs["cornerRefinementMaxIterations"] >> params->cornerRefinementMaxIterations;
371     fs["cornerRefinementMinAccuracy"] >> params->cornerRefinementMinAccuracy;
372     fs["markerBorderBits"] >> params->markerBorderBits;
373     fs["perspectiveRemovePixelPerCell"] >> params->perspectiveRemovePixelPerCell;
374     fs["perspectiveRemoveIgnoredMarginPerCell"] >> params->perspectiveRemoveIgnoredMarginPerCell;
375     fs["maxErroneousBitsInBorderRate"] >> params->maxErroneousBitsInBorderRate;
376     fs["minOtsuStdDev"] >> params->minOtsuStdDev;
377     fs["errorCorrectionRate"] >> params->errorCorrectionRate;
378     return true;
379 }
380
381 void VisionClass::init(){
382     bool readOk = readVisionParameters("../vision_params.yml");
383     if(!readOk) {
384         cerr << "Invalid general vision parameters file" << endl;
385         exit(0);
386     }
387
388     /*** Vision setup ***/
389     detectorParams = aruco::DetectorParameters::create();
390     readOk = readDetectorParameters( "../detector_params.yml", detectorParams );
391     if(!readOk) {
392         cerr << "Invalid detector parameters file" << endl;
393         exit(0);
394     }
395
396     dictionary =
397         → aruco::getPredefinedDictionary(aruco::PREDEFINED_DICTIONARY_NAME(dict_type));
398
399     readOk = readCameraParameters(calibration_file, camMatrix, distCoeffs);
400     if(!readOk) {
401         cerr << "Invalid camera file" << endl;
402         exit(0);
403     }
404
405     if (charuco){
406         charucoboard = aruco::CharucoBoard::create(squaresX, squaresY, square_length,
407             → marker_length_ch, dictionary);
408         board = charucoboard.staticCast<aruco::Board>();
409         axisLength = 0.5f * ((float)min(squaresX, squaresY) * (square_length));
410     }
411     else{
412         axisLength = 0.5f * marker_length;
413     }
414
415     if (video_file!=""){
416         inputVideo.open(video_file);
417     }
418     else{
419         inputVideo.open(0);
420         inputVideo.set(CAP_PROP_FRAME_WIDTH, frame_width);
421         inputVideo.set(CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, frame_height);
422         string cmd;
423         if (fps!=0){
424             cmd=(string)"v4l2-ctl -d /dev/video0 -p "+ to_string(fps);
425             const char* aux1=cmd.data();
426             system(aux1);
427         }
428         if (exposure_time!=0){

```

```

428         cmd=(string)"v4l2-ctl -d /dev/video0 -c auto_exposure=1 -c
429             ↵ exposure_time_absolute="+ to_string(exposure_time);
430             const char* aux2=cmd.data();
431             system(aux2);
432     }
433     else{
434         system("v4l2-ctl -d /dev/video0 -c auto_exposure=0");
435     }
436     system(" v4l2-ctl -V");
437 }
438 /* Test an image */
439 grab_and_retrieve_image();
440 cout << "Ancho de la imagen:\t" << image.cols << endl;
441 cout << "Alto de la imagen:\t" << image.rows << endl << endl;
442 }
443
444 void VisionClass::print_statistics(Eigen::Vector3d &pos, Eigen::Vector3d &eul){
445     cout << "Image grabbing and retrieving= " << execution_time_video_grab_and_ret * 1000
446         ↵ << " ms " << endl;
447     cout << "Marker detection= " << execution_time_detect * 1000 << " ms " << endl;
448     cout << "Frames with position = " << n_position_get/n_since_call_statistics * 100 <<
449         ↵ \% " << endl;
450
451     if(valid_pose){
452         cout << "Estimated position:\t" << pos[0] << "\t" << pos[1] << "\t"
453             ↵ << pos[2] << endl;
454         cout << "Estimated orientation:\t" << eul[0] << "\t" << eul[1] << "\t" <<
455             ↵ eul[2] << endl;
456     }
457     n_position_get=0;
458     n_since_call_statistics=0;
459     cout << endl;
460 }
```

B.4 mavlink_helper.h

```

1 #include <mavSDK/mavSDK.h>
2 #include <mavSDK/plugins/offboard/offboard.h>
3 #include <mavSDK/plugins/telemetry/telemetry.h>
4 #include <mavSDK/plugins/offboard/offboard.h>
5 #include <mavSDK/plugins/mocap/mocap.h>
6 #include <Eigen/Dense>
7
8 // Estas funciones han sido elaboradas con la ayuda del ejemplo:
9 // https://github.com/mavlink/MAVSDK/blob/07e711384a93b077b7ee89c174562a8807ad492d/
10 // examples/offboard_velocity/offboard_velocity.cpp
11
12 using namespace mavSDK;
13 using std::chrono::milliseconds;
14 using std::this_thread::sleep_for;
15
16 //##define CONNECTION_URL "serial:///dev/ttyUSB0:921600"
17 #define CONNECTION_URL "udp://:14540"
18 //##define UUID 3690507541151037490 // autopilot cube
19 //##define UUID 3762846584429098293 // autopilot cuav
20 #define UUID 5283920058631409231 // simulation
21 #define ERROR_CONSOLE_TEXT "\033[31m" // Turn text on console red
22 #define NORMAL_CONSOLE_TEXT "\033[0m" // Restore normal console colour
23
24 static float pos_north=0;
25 static float pos_east=0;
26 static float pos_down=0;
27
28 class CommunicationClass{
29     public:
30         void send_msg(Eigen::Vector3d pos, Eigen::Vector3d eul);
```

```

31         void send_pos_setpoint(float x, float y, float z);
32     void init();
33     private:
34         void wait_until_discover(Mavsdk& dc);
35     shared_ptr<Mocap> mocap;
36     shared_ptr<Telemetry> telemetry;
37     shared_ptr<Offboard> offboard;
38     Mocap::VisionPositionEstimate est_pos;
39     Mavsdk dc;
40     ConnectionResult connection_result;
41 };
42
43
44 void CommunicationClass::wait_until_discover(Mavsdk& dc)
45 {
46     std::cout << "Waiting to discover system..." << std::endl;
47     std::promise<void> discover_promise;
48     auto discover_future = discover_promise.get_future();
49
50     dc.register_on_discover([&discover_promise](uint64_t uuid) {
51         std::cout << "Discovered system with UUID: " << uuid << std::endl;
52         discover_promise.set_value();
53     });
54
55     discover_future.wait();
56 }
57
58 void CommunicationClass::init()
59 {
60     connection_result = dc.add_any_connection(CONNECTION_URL);
61
62     if (connection_result != ConnectionResult::Success) {
63         std::cout << ERROR_CONSOLE_TEXT << "Connection failed: " << connection_result
64             << NORMAL_CONSOLE_TEXT << std::endl;
65         exit(0);
66     }
67
68     bool connected = dc.is_connected(UUID);
69     while(connected==false){
70         connected = dc.is_connected(UUID);
71         cout << "Waiting system for connection ..." << endl;
72         sleep_for(milliseconds(500));
73     }
74     System& system = dc.system(UUID);
75
76     mocap = std::make_shared<Mocap>(system);
77     telemetry = std::make_shared<Telemetry>(system);
78     offboard = std::make_shared<Offboard>(system);
79
80     // Set update rate
81 //     const Telemetry::Result set_rate_result = telemetry->set_rate_position(1.0);
82 //     if (set_rate_result != Telemetry::Result::Success) {
83 //         // handle rate-setting failure (in this case print error)
84 //         std::cout << "Setting rate failed:" << set_rate_result << std::endl;
85 //     }
86     telemetry->subscribe_position_velocity_ned([](Telemetry::PositionVelocityNed posvel) {
87         pos_north=posvel.position.north_m;
88         pos_east=posvel.position.east_m;
89         pos_down=posvel.position.down_m;
90     });
91 }
92
93 void CommunicationClass::send_msg(Eigen::Vector3d pos, Eigen::Vector3d eul)
94 {
95     est_pos.position_body.x_m = pos[0];
96     est_pos.position_body.y_m = pos[1];
97     est_pos.position_body.z_m = pos[2];
98     est_pos.angle_body.roll_rad = eul[0];
99     est_pos.angle_body.pitch_rad = eul[1];
100    est_pos.angle_body.yaw_rad = eul[2];
101    std::vector<float> covariance{NAN};

```

```
102     est_pos.pose_covariance.covariance_matrix=covariance;
103     Mocap::Result result= mocap->set_vision_position_estimate(est_pos);
104     if(result!=Mocap::Result::Success){
105         std::cerr << ERROR_CONSOLE_TEXT << "Set vision position failed: " << result <<
106             NORMAL_CONSOLE_TEXT << std::endl;
107     }
108
109 void CommunicationClass::send_pos_setpoint(float x, float y, float z)
110 {
111     Offboard::PositionNedYaw pos_setpoint{};
112     pos_setpoint.north_m=x;
113     pos_setpoint.east_m=y;
114     pos_setpoint.down_m=z;
115     pos_setpoint.yaw_deg=0; // TODO: decide yaw. Se podrá Nan?
116     Offboard::Result result = offboard->set_position_ned(pos_setpoint);
117     if(result!=Offboard::Result::Success){
118         std::cerr << ERROR_CONSOLE_TEXT << "Set offboard position setpoint failed: " << result <<
119             NORMAL_CONSOLE_TEXT << std::endl;
120 }
```


Índice de Figuras

1.1	Estación de carga de <i>Flytbase</i>	1
2.1	Manejo de medidas retrasadas	4
2.2	Quadrotor en dos dimensiones	9
2.3	EKF no ejecuta la fase de actualización	10
2.4	Fusión del GPS con retraso	10
2.5	Experimento con manejo de medidas retrasadas	11
3.1	Componentes del quadrotor	14
3.2	A la izquierda: diagrama de flujo del programa que se corre en el ordenador embebido, a la derecha: algunas de las tareas del autopiloto	16
3.3	Sistemas de referencia presentes en el problema	17
3.4	Pasos intermedios en el proceso de detección de marcadores Aruco. Fuente [7]	19
3.5	Superposición de los ejes de referencia del marcador y del cuadrilátero que lo rodea (trazado en verde)	22
3.6	Modo <i>altitude</i>	24
3.7	Modo <i>position</i> desde el instante 158s hasta el 168s	25
3.8	Quadrotor sobrevolando un tablero de marcadores	26

Lista de códigos

2.1	Código 2.1: Corrección del buffer de salida. Ubicado en la línea 488 del archivo <i>Firmware/src/lib/ecl/EKF/ekf.cpp</i>	5
2.2	Código 2.2: Corrección de la orientación. Ubicado en el archivo <i>Firmware/src/lib/ecl/EKF/ekf.cpp</i>	6
2.3	Código 2.3: Cálculo del tamaño del buffer. Ubicado en el archivo <i>Firmware/src/lib/ecl/EKF/estimator_interface.cpp</i>	6
3.1	Código 3.1: Rotación en PX4 de la posición suministrada por la visión	18

Bibliografía

- [1] Aaron Walawalkar. *NHS using drones to deliver coronavirus kit between hospitals*. 2020. URL: <https://www.theguardian.com/technology/2020/oct/17/nhs-drones-deliver-coronavirus-kit-between-hospitals-essex> (visitado 25-11-2020).
- [2] Douglas Gimesy. *Drones and thermal imaging: saving koalas injured in the bushfires*. 2020. URL: <https://www.theguardian.com/australia-news/gallery/2020/feb/11/drones-thermal-imaging-australia-koalas-bushfire-crisis> (visitado 25-11-2020).
- [3] *The art of landing really precisely without GPS*. 2017. URL: <https://www.everdrone.com/news/2017/11/21/the-art-of-landing-really-precisely-without-gps> (visitado 07-11-2020).
- [4] Mohammad Fattahí Sani y Ghader Karimian. «Automatic navigation and landing of an indoor AR. drone quadrotor using ArUco marker and inertial sensors». En: *2017 International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA)*. IEEE. 2017, págs. 102-107.
- [5] Shuo Yang y col. «Precise quadrotor autonomous landing with SRUKF vision perception». En: *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2015, págs. 2196-2201.
- [6] Isidro Jesús Arias Sánchez. «Control de un tiltrotor implementado en el autopiloto de código abierto PX4». En: (2019). URL: <https://idus.us.es/handle/11441/94450>.
- [7] Sergio Garrido-Jurado y col. «Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion». En: *Pattern Recognition* 47.6 (2014), págs. 2280-2292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320314000235>.

