
CAPÍTULO 1

SOFTWARE

El objetivo de esta sección es explicar la implementación en software del vuelo autónomo del cuadricóptero. Se incluyen algunos comentarios sobre su configuración y uso. Para entender en detalle qué hace cada función, referirse a los comentarios en el código fuente, disponible en el repositorio *Git* en la carpeta `src/`. Todas las referencias a archivos son relativas a la raíz del repositorio.

En el anexo ?? se explica como compilar y configurar las partes involucradas.

1.1. Esquema general

El código tiene una estructura modular, está escrito en C, y cada bloque está implementado como una biblioteca. Los programas están pensados para compilarse y ejecutarse en un entorno *Linux*. La estructura general del código se resume en la figura ??.

El software debe correr en tiempo real, por lo que resulta crítico evitar demoras durante la ejecución. Las operaciones de entrada/salida suelen ser un problema (en cualquier plataforma), por lo que en general se utilizan varios hilos, o varios programas intercomunicados, para evitar que la entrada/salida demore a partes del código que no dependen directamente de ella.

El software se distribuye entre varios microprocesadores en placas independientes:

- ***BeagleBoard*:**

- Se trabaja sobre un sistema operativo *Linux*, y se programa en C (se pueden utilizar otros lenguajes).
- Centraliza toda la información, estima el vector de estados y ejecuta las acciones de control.
- Lee de 2 puertos serie, para obtener información de la IMU y del GPS.
- Se encarga de Lectura/escritura a una interfaz de comunicación *WiFi*.
- Lee/escrive a un puerto *I²C*, para comunicación con los *ESCs*.

- Se encarga de la escritura a memoria para almacenar datos relevantes generados durante la ejecución del programa principal. Se utiliza proceso independiente por cada tipo de datos que se desea guardar. Dicho proceso recibe los datos provenientes del programa principal y se encarga de escribirlos a memoria no volatil.
 - Para evitar lidiar con múltiples hilos de ejecución, el programa encargado de mandar comandos a los motores corre por separado del programa principal. El programa principal se encarga de revisar los puertos de entrada/salida, y leer solamente cuando la lectura no requiere de un tiempo de espera. Esto se realiza mediante la función `select()`, un mecanismo que permite simular varios hilos de ejecución sin las complejidades de trabajar con multiples hilos.
- **ESCs:**
- Son 4 microprocesadores conectados como esclavos a un bus I^2C que comparten con la *BeagleBoard*, que hace de maestro.
 - Cada microprocesador se encarga de hacer girar uno de los motores a una velocidad fijada mediante I^2C .
 - El código que ejecutan no está disponible, solamente se conoce el protocolo para manejarlos mediante I^2C .
- **IMU:**
- Se programa en *Arduino*, un lenguaje muy similar a C, con algunas simplificaciones.
 - Lee datos de los sensores y se comunica mediante un puerto serie.
 - El código está fuertemente basado en el que venía con la IMU, fue modificado para adecuarlo a las necesidades del proyecto.
- **GPS:**
- Cuenta con un microprocesador independiente, no se dispone del código que ejecuta.
 - Envía datos a través de un puerto serie (*USB*).

En la sección ?? se describe el software que corre en la IMU. A continuación se describe el software que corre en la *BeagleBoard*, el cual incluye implementaciones del filtro de Kalman descrito en ??, el sistema de control descrito en ??, las calibraciones descritas en ??, el protocolo descrito en ??, y diversas funcionalidades auxiliares.

1.2. Software en la *BeagleBoard*

1.2.1. Requerimientos e inicialización del programa principal

Para correr el programa principal (de ahora en más: *main*) debería bastar con ejecutar el script `src/go.sh`. Durante la inicialización el *main* debe encontrar lo siguiente:

- `K*.txt`: Matrices de control utilizados en el modo *hover*.
- `lqr-*.txt`: Parámetros del algoritmo *LQR*.
- IMU: La IMU envía datos a través de una *UART* que es mapeada por el sistema operativo a un “archivo” `/dev/tty*`. El *main* recibe como parámetro la ruta a este archivo, o en su defecto un log `imu_raw.txt` generado por el *main* en una ejecución previa.
- `imu_calib.txt`: Parámetros de calibración, la biblioteca *imu_comm* los necesita para convertir los datos crudos provenientes de la IMU.
- GPS: Los datos provenientes del GPS (*USB*) son mapeados por el sistema operativo a `/dev/ttyUSB*`. No se interactúa directamente con este archivo, se utiliza la biblioteca *gps_comm* para iniciar un cliente que se comunice con el *gpsd*, que es el programa que se encarga de leer y analizar los datos crudos provenientes del GPS. El *gpsd* es iniciado por el script `go.sh`.
Si no se dispone de señal del GPS se puede configurar un modo de prueba en el que se simulan los datos del GPS (a 1Hz) generando ceros, o números al azar dentro de un rango dado. También es posible deshabilitar completamente el GPS y trabajar con un vector de estados reducido. Más adelante se explica como configurar los distintos modos.
- `cmd`: El driver de los motores, encargado exclusivamente de enviar continuamente comandos *I²C* a los ESCs con la última velocidad configurada¹. La comunicación entre el driver y el *main* se realiza mediante la biblioteca *motor*, que a su vez se comunica con el driver mediante colas de kernel (IPC²), utilizando la biblioteca *uquad_kernel_msgq*.
Durante pruebas, se puede configurar el driver para que simule la presencia de los motores, o para que lea de la entrada estándar. Ver `src/i2c_beagle/README` por información sobre como compilar los distintos modos.

¹Los motores se apagan si no reciben comandos continuamente.

²*Interprocess Communication*: <http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/C>.

1.2.2. Loop

En la figura ?? se muestra un diagrama del *main*, y en la ?? se muestra el loop que se ejecuta durante el funcionamiento normal (una vez terminada la inicialización).

A continuación se describen las etapas del loop, explicando brevemente las funcionalidades de cada una de las bibliotecas involucradas:

1. **imu:** La IMU genera datos nuevos cada 10ms. Al comienzo del loop, el *main* revisa si hay datos nuevos, y en caso afirmativo llama a la biblioteca para que los lea. Cuando se completa una trama, los datos crudos se almacenan en una cola circular mantenida por la biblioteca *imu_comm*. Al terminar de recibir una trama, se vuelve al principio del loop para verificar que no hay más nada para leer. En caso de haber más datos entonces hay que leerlos para evitar atrasarse respecto a la IMU, en caso contrario se convierten los datos y se avanza.
2. **gps:** El GPS genera datos nuevos a una tasa mucho menor que la IMU. Cada vez que se dispone de una muestra nueva en la IMU, el *main* revisa si también hay un dato nuevo del GPS. Avanza aunque no se disponga de datos nuevos del GPS.
3. **kalman:** El filtro de Kalman está implementado en la biblioteca *kalman*. Recibe una estructura de datos generada por *imu_comm* y otra (opcional) generada por *gps_comm*. Mantiene una estructura de datos que almacena el estado estimado y las matrices de covarianza.
4. **path planner:** El módulo generador de rutas está implementado en la biblioteca *path_planner*. Compara el estado actual con el objetivo, y determina si se completó el objetivo actual³. En caso afirmativo, devuelve una bandera que le indicará al módulo de control que debe actualizar la matriz de control para ajustarla a la nueva trayectoria.
5. **control:** El módulo de control está implementado en la biblioteca *control*. Mantiene una estructura con las matrices del control proporcional e integral (si corresponde). Recibe como argumento el estado estimado (de la biblioteca *kalman*), la velocidad actual de los motores (Mantenida por la biblioteca *motor*), y una estructura generada por *path_planner* que indica el estado objetivo y la trayectoria a seguir. Devuelve la acción de control (velocidades angulares) a aplicar sobre los motores.
6. **motor:** Recibe las velocidades angulares determinadas por el módulo *control*, las convierte a I^2C y envía el resultado al driver, quien se encarga de establecer la nueva velocidad deseada.

Por información relativa a bloques, configuración, compilación, ejecución, etc, referirse a `src/README`.

³Solamente se implementó el modo *hover*.

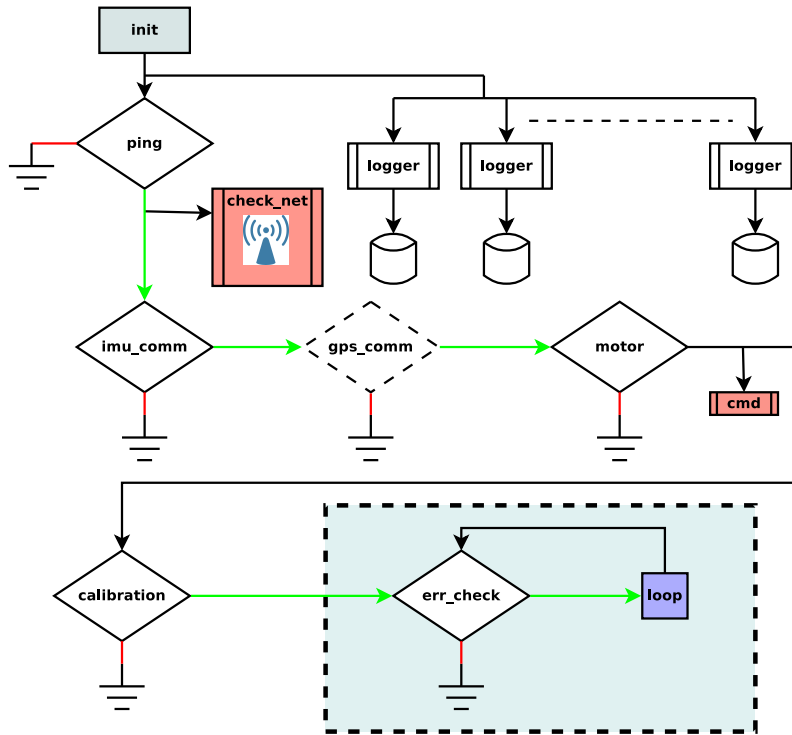


Figura 1.1: Diagrama de flujo del programa principal.

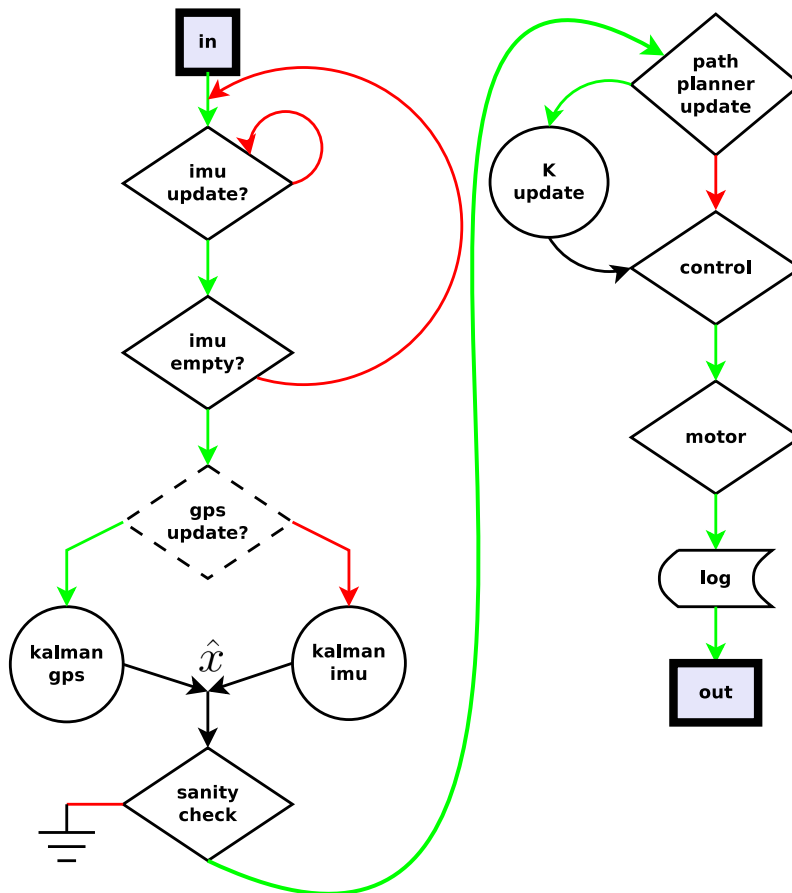


Figura 1.2: Loop principal.

1.2.3. Módulo *imu_comm*

A continuación se describen algunas de las funcionalidades a destacar de la biblioteca *imu_comm*.

- **Calibración:** Se acumulan un conjunto de muestras que después se utilizan para estimar el offset de los giróscopos, la altura inicial, y pueden ser utilizados para inicializar el filtro de *Kalman*. Durante la calibración es crítico que el cuadricóptero no se mueva, ya que en caso de hacerlo el offset de los giróscopos será mal estimado.

La inclinación durante la calibración afecta la estimación inicial del offset en los acelerómetros, pero en caso de no estar perfectamente horizontal se acomodará luego de unos segundos, no es algo crítico.

- **Conversión:** Cargando parámetros de calibración, es posible convertir datos crudos provenientes de los sensores (cuentas de un ADC) a datos útiles:

- Acelerómetro → Aceleraciones.
- Giróscopo → Velocidad angulares.
- Acelerómetro + Magnetómetro → Ángulos de Euler⁴.
- Barómetro → Altura y temperatura.

Para la conversión se utilizaron las calibraciones obtenida de la parte ??.

- Magnetómetro:

$$conv = T.K_{inv}.(crudo - b) \quad (1.1)$$

donde

- T corrige el problema del *cross axis sensitivity*.
- K_{inv} es la inversa de la matriz de ganancias.
- b Es un offset.
- Acelerómetro: Además de una calibración como la del magnetómetro, se implementó una compensación por temperatura:

$$conv = T * inv(K) * (crudo - b + b_t * (t - t_0)) \quad (1.2)$$

donde

- T , K y b cumplen el mismo rol que en el magnetómetro.
- t es la temperatura actual, y t_0 la temperatura a la que se realizó la calibración de donde surgieron T , K y b .
- b_t es el factor que permite la compensación por temperatura.
- Giróscopo: Se implementó algo análogo a lo que se hizo para el acelerómetro, solo que al final se le resta un offset que se determina durante la calibración al inicio del programa. Este offset es sencillo de estimar, basta con que el cuadricóptero no se mueva durante la calibración. Implementar algo análogo pero para el caso del acelerómetro requeriría

⁴La estructura de datos convertidos **no** incluye información sobre el campo magnético, incluye solamente los ángulos de Euler obtenidos a partir del acelerómetros y del magnetómetro. De ser necesaria la información de campo magnético, es sencilla de agregar.

que el cuadricóptero estuviese perfectamente horizontal durante la calibración, y para el magnetómetro que estuviese mirando hacia el norte. Estos requisitos son más complicados de cumplir (requerirían de una plataforma de despegue) por lo que no se implementó.

- **Verificación:** Se llevan 2 banderas que indican si la norma del vector de aceleración y la del vector de campo magnético caen dentro del rango esperado. Esto puede ser de utilidad en el filtro de Kalman.
- **Filtrado:** Se disponen de funciones que permiten obtener el elemento más nuevo que aún no ha sido utilizado, o el resultado de aplicar un filtro FIR⁵ a los n elementos más recientes de la cola. Si por problemas de tiempo el *main* se retrasa, pueden haber datos que nunca sean etiquetados como “el dato más nuevo”, ya que se leerá hasta ponerse al día. De cualquier forma, serán tomados en cuenta en el filtro.

El filtro implementado trabaja sobre los datos crudos convertidos a punto flotante:

$$y[n] = 0,2x[n] + 0,2x[n-1] + 0,2x[n-2] + 0,2x[n-3] + 0,1x[n-4] + 0,1x[n-5] \quad (1.3)$$

El objetivo del filtro es reducir el ruido en los datos crudos. En la figura ?? se observa los datos crudos provenientes del giroscopo, junto con los datos filtrados.



Figura 1.3: Comparación del ruido presente en los datos crudos provenientes del giroscopo eje x con el cuadricóptero quieto y el resultante luego de aplicar el filtro de la ecuación ??.

Configurando adecuadamente los coeficientes del filtro y el largo del mismo se puede hacer que trabaje como un promedio, que no haga nada, etc.

⁵Los coeficientes del filtro están definidos en *imu_comm_init()*.

NOTA: El filtro fue desactivado, ya que introduce un retardo que deteriora la performance del sistema, y en realidad el filtro FIR es redundante con el filtro de Kalman.

- **Modo *FAKE*:** Seteando `IMU_COMM_FAKE` a 1, la biblioteca leerá de un log `ascii` en lugar de utilizar el puerto serie. En el modo *FAKE* los tiempos no son un problema crítico, ya que no correrá en tiempo real.
- **Ángulos de Euler:** Para calcular los ángulos de Euler (en radianes) a partir del vector de aceleración y del campo magnético se tomó como referencia [?]. Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\phi_k = \begin{cases} -asin\left(\frac{Acc_x}{||\vec{Acc}||}\right) & |Acc_x| < 0,99||\vec{Acc}|| \\ -\frac{\pi}{2}sign(Acc_x) & |Acc_x| \geq 0,99||\vec{Acc}|| \end{cases}$$

$$\psi_k = \begin{cases} -atan2\left(\frac{Acc_y}{Acc_z}\right) & |Acc_x| < 0,99||\vec{Acc}|| \\ 0 & |Acc_x| \geq 0,99||\vec{Acc}|| \end{cases}$$

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \sin(\psi) & \cos(\psi) \sin(\phi) \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) \sin(\psi) & \cos(\phi) \cos(\psi) \end{pmatrix}$$

$$v = M.Magn$$

$$\theta_k = -atan2\left(\frac{v[1]}{v[0]}\right) + 0,17$$

El offset en θ_k es debido a que el campo magnético en Uruguay no apunta directamente hacia el norte.

1.2.4. Módulo *kalman*

Aparte de implementar el filtro de Kalman descrito en la sección ??, la biblioteca *kalman* se encarga de:

- Suavizar la estimación del ángulo *theta* dada por los acelerómetros y los magnetómetros antes de introducirlo en el filtro de Kalman. El ruido presente en los acelerómetros, sumado a la mala performance del magnetómetro en lugares cerrados⁶, hace que sea necesario utilizar una lógica de suavizado más inteligente que un simple filtrado para combatir los saltos en la discontinuidad en la función *atan()*, utilizada para calcular θ . La corrección se aplica al dato convertido previo a su utilización en el filtro de Kalman. La implementación es la siguiente ecuación:

$$\theta_k = \begin{cases} \theta_k & |\theta_k - \hat{\theta}_{k-1}| < \pi \\ \theta_k - 2\pi \text{fix}\left(\frac{\theta_k - \hat{\theta}_{k-1} + \pi \text{sign}(\theta_k - \hat{\theta}_{k-1})}{2\pi}\right) & |\theta_k - \hat{\theta}_{k-1}| \geq \pi \end{cases}$$

⁶Se probó en lugares con muchos materiales metálicos, distorsionan las lecturas del magnetómetro.

donde θ_k es el dato nuevo proveniente de la IMU, $\hat{\theta}_{k-1}$ es la estimación actual, generada por el filtro de Kalman en el paso previo.

Para ψ y ϕ no se implementó una corrección de este tipo, ya que el cuadricóptero no debe inclinarse 90° , y el ruido en los datos no es suficiente para que durante el funcionamiento normal la medida llegue a valores cercanos a la discontinuidad.

- Llevar una estimación del *bias* en los acelerómetros, cuyo objetivo es corregir errores sistemáticos.
- Existe la posibilidad de modificar la matriz de ruidos de observación, para las estimaciones realizadas a partir de información proveniente del acelerómetro y del magnetómetro, en función de la norma del vector medido por cada sensor⁷.

Por detalles referirse a `src/kalman/uquad_kalman.c`.

1.2.5. Módulo de *control*

La implementación del módulo de control se hizo en la biblioteca *control*. Las funcionalidades implementadas son las siguientes:

- Control proporcional e integral.
- Linealización del sistema en torno a una trayectoria y un *set point* dados, y cálculo de las matrices de control correspondientes mediante *LQR*.

Como se mencionó en ??, el vector de estados almacenado por el filtro de Kalman incluye, además de las variables de estado del sistema, tres variables para la estimación del *bias* de los acelerómetros. Estos tres términos no se utilizan en la módulo de control.

Control proporcional

El control proporcional se rige por la siguiente ecuación:

$$\vec{\omega}_{prop} = K_{prop}(\vec{s}p_x - \vec{x}_{est}) \quad (1.4)$$

donde

- $\vec{s}p_x$ Es el estado deseado, dado por el módulo *path_planner*.
- \vec{x}_{est} Es la estimación del estado del sistema en el momento actual, dada por el filtro de Kalman.

⁷Esta idea se tomó de <http://www.vectornav.com>.

Control integral

El control integral es más complejo, ya que incluye restricciones que son necesarias en la práctica. A continuación se presenta un pseudocódigo de la función que implementa la integral. Se aplica de manera independiente a cada una de las variables sobre la cual se desea llevar un control integral:

$$err = \max(\min(sp_{x_i} - \hat{x}_i \cdot T_s, th_{max}), -th_{max})$$

$$int_k = \begin{cases} int_{k-1} & |err| > th_{dist} \\ \max(\min(err + int_{k-1}, th_{accum}), -th_{accum}) & |err| \leq th_{dist} \end{cases}$$

donde:

- sp_i y \hat{x}_i : Setpoint y estado estimado para el i -ésimo elemento del vector de estados (el cual se desea control usando un control integral).
- err : Diferencia entre el estado deseado y el actual: $err = sp_x - x$.
- int_{k-1} : Valor acumulado hasta el instante previo.
- int_k : Nuevo valor para la integral.
- T_s : Período de muestreo.
- Umbrales (definidos, para cada una de las variables a integrar, en `src/control/control.h`) para los 3 controles implementados:
 1. No se integra si la diferencia entre el estado actual y el deseado es mayor a un umbral dado por th_{dist} , ya que se asume que esa situación debe ser resuelta por el control proporcional.
 2. Para evitar que la integral crezca muy rápido se utiliza un umbral th_{max} , el máximo error que se acepta integrar está acotado por $th_{max} \cdot T_s$.
 3. Por último, si por algún motivo la integral acumula demasiado el sistema tardará mucho en recuperarse, por lo que se satura el integrador en th_{accum} .

Una vez calculada la integral, la ecuación que genera la acción de control integral es:

$$\vec{\omega}_{int} = K_{int} x_{int} \quad (1.5)$$

Control total

La acción de control viene dada por

$$\vec{\omega} = \vec{s\dot{p}}_{\omega} + \vec{\omega}_{prop} + \vec{\omega}_{int} \quad (1.6)$$

donde $\vec{s\dot{p}}_{\omega}$ es velocidad angular que se desea setearle a los motores, definida por el módulo *path_planner*.

Las matrices de control para el modo *hover* se encuentran en:

- Proporcional (K_{prop}): `src/control/K_prop_pptz.txt`
- Integral (K_{int}): `src/control/K_int_full_pptz.txt`.

Estas matrices son utilizadas en el modo *hover*, donde no hace falta utilizar *LQR*. Son archivos de texto plano, y si se modifican entonces los cambios serán tomados en cuenta al ejecutar el script `src/go.sh`.

1.2.6. Generador de rutas

La versión actual del código implementa solamente el modo *hover*. El *set point* inicial es cero para todas las variables, excepto para el ángulo θ , para el cual se tomará el ángulo inicial, y para la altura (1m por defecto).

Se pueden modificar las condiciones de *hovering* en `src/main/main.c`.

En *MatLab* hay una implementación del generador de rutas, queda pendiente pasarlo a C.

Modo Manual

En el modo *hover* es posible modificar el *set point* desde la línea de manera remota. Para ellos, iniciar el *main* y apretar la tecla `m`, seguida de un `ENTER`. Esto seteará el *main* en modo manual, y estará dispuesto a recibir comandos. Cada comando modificará el *set point*, y será considerado solamente luego de presionar `ENTER`. La lista de comandos se encuentra en `src/common/manual_mode.h`.

1.2.7. Driver de los motores y módulo *motor*

La biblioteca *motor* y el driver `src/i2c_beagle/cmd_motores.c` (de ahora en más *cmd*) tienen una fuerte relación, y deben ser coherentes. El driver no se pudo incluir como una biblioteca más, ya que requiere de un encabezado que solamente está disponible en la *BeagleBoard*.

Algunas consideraciones relevantes:

- El *cmd* espera una velocidad superior a cierto mínimo, de lo contrario no arrancará los motores. Este umbral debe estar apareado, de lo contrario *motor* será incapaz de arrancar los motores en el momento apropiado. Luego del arranque, *motor* se encargará de no enviar valores por debajo de los valores definidos como mínimo y máximo. Usar valores por debajo del mínimo puede hacer que se apaguen los motores, y valores por encima del máximo pueden sobrecalentar los contactos de los cables que alimentan a los motores. El máximo también debe estar apareado entre el *cmd* y *motor*. El *cmd* reportará un error en caso de recibir valores fuera de rango.
- Al arrancar los motores, el *cmd* setea velocidades en torno a una rampa⁸ desde 0 hasta el valor definido como mínimo, al cual el cuadricóptero no es capaz de levantar vuelo.
- Por cada comando que *motor* envía al *cmd*, este último responde con un *ack*. Así *motor* verifica que el *cmd* está funcionando⁹.

ADVERTENCIA: Cualquier mensaje de error reportado por el *cmd* es motivo suficiente para detener el vuelo y analizar el problema.

⁸La implementación son valores que saltan por encima y por debajo de la rampa, esta técnica ha demostrado ser eficiente para hacer arrancar los motores.

⁹Solamente se verifica que hay comunicación, pero la implementación es tal que si la comunicación es exitosa, entonces todo debería estar funcionando correctamente.

1.2.8. Tiempos

El período de muestreo resulta fundamental para tanto el filtro de Kalman como el control integral. Para llevar el tiempo se dispone de funciones del sistema operativo que tienen precisión de microsegundos. Se consulta el tiempo al momento de llamar a las bibliotecas *kalman* y *control* y se lo almacena, de manera de poder estimar un período de muestreo a partir del tiempo transcurrido entre llamadas sucesivas.

El máximo retardo entre que se lee un dato nuevo de la IMU y que se efectúa una acción de control es de 10ms, en general es de 8ms. Retardos mayores llevarían a perder muestras de la IMU, lo cual sería detectable en el log de errores. Por más información sobre los logs referirse al anexo ??.

1.2.9. Comunicación

La comunicación con la *BeagleBoard* se hace mediante *ssh*. En el anexo ?? se explica como configurar las partes involucradas.

1.2.10. Configuración

Parametros del sistema

- `src/common/uquad_types.h`: La mayor parte de los parámetros del sistema están definidos aquí, entre ellos la masa, el tensor de inercia, el orden del vector de estados, período de muestreo, etc.
- `src/CMakeLists.tx`: La variable `USE_GPS` es un booleano que determina si ha de utilizarse el GPS o no.
- `src/common/uquad_config.h`: En este archivo se configura el modo de funcionamiento. Se realizan controles sobre las opciones elegidas, evitando que el usuario seleccione un modo inválido. Es posible elegir:
 - Trabajar con 8 estados o con 12.
 - Guardar logs.
 - Habilitar control integral.
 - Si el GPS fue habilitado, es posible utilizar un GPS de mentira, útil para pruebas.
 - Cada cuantas muestras de la IMU se desea efectuar una acción de control.
- `src/imu/imu_comm.h`: Permite:
 - Permite configurar el largo del filtro LPF, cuyos coeficientes se definen en `src/imu/imu_comm.c`.
 - Elegir entre leer de un log o de la IMU.
 - Elegir el largo de la cola circular donde se almacenan los datos crudos (debe ser mayor que la cantidad de coeficientes del filtro).
 - Seleccionar cuantas muestras han de usarse para la calibración (512 por defecto).

Control

Para el modo *hover*, basta con modificar las matrices en `src/control/`, de donde se leen las ganancias a utilizar. Para el resto de los modos hay que modificar los archivos de donde se configura el *LQR*. En la sección ?? se explicó como modificar la estrategia de control.

Ruidos Kalman

En `src/kalman/uquad_kalman.c` se definen los ruidos de transición de estados y de observación. Los valores que varían al utilizar el modo de covarianza dinámica (en función de la norma de los vectores de aceleración y campo magnético) se definen en `src/kalman/uquad_kalman.h`.

1.3. Software en la IMU

La IMU cuenta con un microprocesador *ATmega328p*. Queda disponible poder computacional como para agregar más funcionalidades. Las tareas que se le asignaron al programa que ejecuta la IMU son:

- Leer de los sensores: Acelerómetro, Giróscopo, Magnetómetro y Barómetro.
- Armar una trama de datos, que puede ser en ASCII o binario, y enviarlos mediante una *UART*.
- Enviar una trama cada 10ms en la cual se incluyen:
 - Un caracter ASCII de inicio de trama: A.
 - El tiempo (en microsegundos) que tardó el loop de lectura.
 - El promedio de dos muestras del:
 - Acelerómetro (x,y,z), en cuentas del ADC.
 - Giróscopo (x,y,z), en cuentas del ADC.
 - Magnetómetro (x,y,z), en cuentas del ADC.
 - Un dato nuevo del barómetro:
 - Temperatura (en C^o multiplicados por un factor de 10).
 - Presión (en Pascales).
 - Un caracter ASCII de fin de trama: Z.

Si la IMU trabaja en modo ASCII, una trama tiene el siguiente aspecto:

```
A 11968 -8 -4 211 11 42 6 -14 -3 154 160 102025 Z
```

Los elementos se separan mediante un caracter `\t`, y la línea se termina con un `\n`. En modo binario el formato es el mismo, solo que sin caracteres de separación ni de fin de línea.

1.3.1. Cambios al software original

El código original que trae la IMU fue modificado. El problema principal que tenía era que la frecuencia de muestreo no era estable. Los cambios más relevantes fueron:

- Transmisión de datos en segundo plano, mediante interrupciones, evitando demorar el loop principal al momento de transmitir.
- Posibilidad transmitir en binario (se mantuvo el modo ASCII, pero no es posible transmitir a 10ms en dicho modo).
- Se modificó el formato de los datos enviados al puerto serie.
- El barómetro demora varios milisegundos entre que se le pide un dato y que lo tiene disponible. El código original esperaba durante este tiempo. La versión modificada sigue trabajando y vuelve para recoger el dato luego que transcurrió el tiempo en cuestión. Se implementó una máquina de estados para el manejo del barómetro. No se implementó mediante interrupciones, ya que las transacciones a través del puerto I^2C en general son secuencias del tipo:
 1. Indicar de que dirección se quiere leer.
 2. Seleccionar el registro del cual se desea leer.
 3. Recibir los datos.

No se debe usar el puerto I^2C durante una secuencia de este tipo.

1.3.2. Diagrama de flujo

En la figura ?? se muestra un diagrama del programa que ejecuta la IMU.

- Las operaciones en círculos rojos requieren de acceso al puerto I^2C .
- Las flechas verdes indican que el resultado de evaluar la condición fue positivo, las rojas indican que la condición no se cumplió.

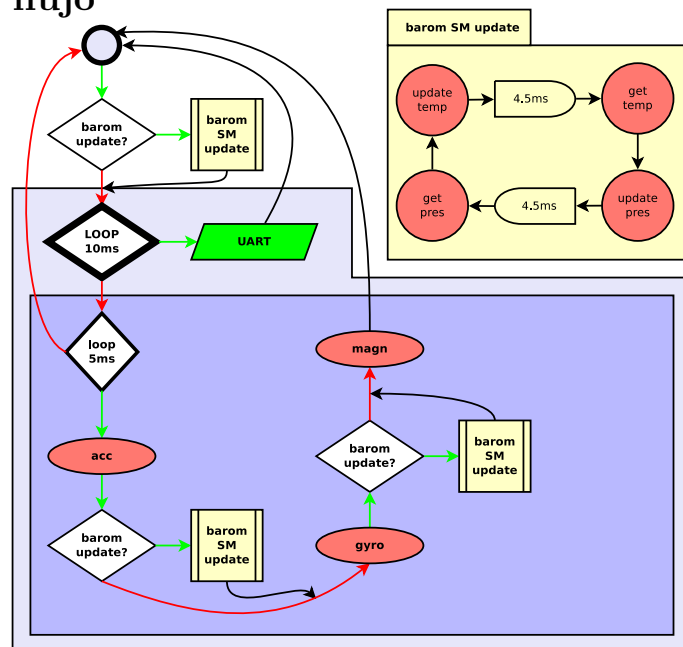


Figura 1.4: Diagrama de flujo del programa que ejecuta la IMU.

- La condición *barom update?* se verifica cuando se cumplió alguno de los retardos de 4.5ms requeridos por el barómetro, en este caso se debe avanzar la máquina de estados.