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 1.1.

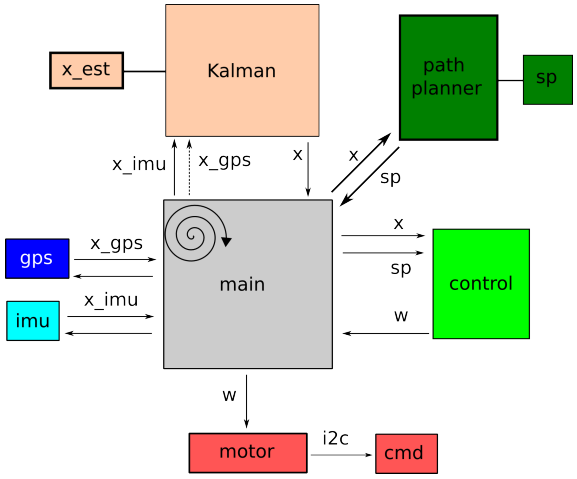

Figura 1.1: Estructura general del código.

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 programa en `C` (se pueden utilizar otros lenguajes).

- Centraliza toda la información, estima el vector de estados y ejecuta las acciones de control.
- Lectura de 2 puertos serie, para obtener información de la IMU y del GPS.
- Lectura/escritura a una interfaz de comunicación *WiFi*.
- Lectura/escritura a un puerto I^2C, para comunicación con los *ESCs*.
- Escritura a memoria para almacenar datos relevantes. Se utiliza proceso independiente por cada tipo de datos que se desea guardar, el cual recibe los datos provenientes del programa principal y se encarga de escribirlos a memoria no volatil cuando corresponda.
- 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 un 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 1.3 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 interactua directamente con este archivo, se utiliza la biblioteca *gps_comm* para iniciar un cliente que se comunique 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 envíar continuamente comandos *i2c* a los ESCs con la última velocidad configurada[1]. 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 (IPC[2]), 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.

1.2.2. Loop

A continuación se describe un loop normal ejecutado por el *main*, 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

[1] Los motores se apagan si no reciben comandos continuamente.
[2] *Interprocess Communication*: `http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/C`.

en una cola circular. 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 actual[3]. 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 y la velocidad actual de los motores, y una estructura generada por *path_planner*, que indica el estado objetivo y la trayectoria a seguir. Devuelve la acción de control a aplicar sobre los motores.

6. **motor:** Se envía al driver una nueva velocidad deseada.

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

1.2.3. Módulo *imu_comm*

A continuación se decriben 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.

[3] Solamente se implementó el modo *hover*.

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

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

- Magnetómetro:

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

  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:

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

  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. Esto es sencillo de estimar, ya que basta con que el cuadricóptero no se mueva durante la calibración.
  Implementar algo análogo pero para el caso del accelerómetro o del magnetómetro sería más complicado, ya que requeriría que el cuadricóptero estuviese perfectamente horizontal o orientado hacia el norte, respectivamente.

- **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 FIR[4] a los 6 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 dia. De cualquier forma, serán tomados en cuenta en el filtro.

- **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.

[4]Los coeficientes del filtro están definidos en *imu_comm_init()*.

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. El ruído presente en los acelerómetros, sumado a la mala performance del magnetómetro en lugares cerrados[5], hace que sea necesario utilizar una lógica de suavizado más inteligente que un simple filtrado.
- Llevar una estimación del *bias* en los acelerómetros, cuyo objetivo es correjir errores sistemáticos.
- Existe la posibildad 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 sensor[6].

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 1.2.4, 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 ecuacion:

$$\vec{\omega}_{prop} = K_{prop}(\vec{sp}_x - \vec{x}_{est}) \tag{1.3}$$

donde

- $\vec{sp}_x$ 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.

[5] Se probó en lugares con muchos materiales metálicos, distorsionan las lecturas del magnetómetro.
[6] Esta 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:

```
integral = f_int(integral, err, Ts, th_dist, th_max, th_accum)

// 1
if (|err| > th_dist)
{
  return integral;
}

// 2
err = min(err * Ts, th_max);
if (err < 0)
    err = max(err, -th_max);

// 3
integral = min(err + integral, th_accum);
if(integral < 0)
    integral = max(integral,-th_accum);

return integral;
```

Los argumentos son:

- *err*: Diferencia entre el estado deseado y el actual: $err = sp_x - x$.
- *integral*: Valor actual de la integral.
- Ts: 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 $th_{max}.Ts$.
  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:

$$\vec{\omega}_{int} = K_{int} x_{int} \tag{1.4}$$

Control total

La acción de control viene dada por

$$\vec{\omega} = \vec{sp}_{\omega} + \vec{\omega}_{prop} + \vec{\omega}_{int} \tag{1.5}$$

donde $\vec{sp}_{\omega}$ 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 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 liñea 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 los 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 una rampa[7] 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 funcionando[8].

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

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 efectua 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 aqui, 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 la 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.

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

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

    - 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 1.2.10 se explicó como modificar la estrategía 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 datos 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*.

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:

- Se implementó transmisión de datos en segundo plano, mediante interrupciones, evitando demorar el loop principal al momento de transmitir.
- Se agregó la posibilidad transmitir en binario (se mantuvo el modo `ASCII`, pero no es posible transmitir a 10ms en dicho modo).

- 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 modificó el formato de los datos envíados al puerto serie.