

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este apartado se presentan las conclusiones que se han obtenido durante el desarrollo del proyecto. Desde un punto de vista general y teniendo en cuenta todas y cada una de las etapas del proyecto, se pueden entender con mayor facilidad los resultados obtenidos y evaluar la calidad de los mismos. Se pretende con esto reconocer aquellas partes del proyecto que han cumplido con las expectativas que se tenían al empezar y aquellas otras que aún son susceptibles de ser mejoradas en desarrollos futuros. Consecuentemente puede decirse:

1. El objetivo principal de este proyecto ha sido la creación de un prototipo de sistema basado en la tecnología LIDAR para una aeronave de pequeñas dimensiones, con el fin de generar modelos digitales del terreno o MDTs. En los MDTs generados que se han mostrado en este documento se aprecia una gran similitud con las fotografías que fueron tomadas en el mismo escenario. En algunos de ellos incluso se distinguen elementos con un alto nivel de detalle, como son árboles, estructuras metálicas, farolas, etc. Por esta razón se considera que el objetivo principal del proyecto se ha alcanzado satisfactoriamente.
2. El proyecto ha permitido conocer las características necesarias para la construcción de un sistema basado en la tecnología LIDAR para generar MDTs, desde sus fundamentos físicos (sistemas de coordenadas utilizados, conceptos de navegación y otros) hasta las características del software necesario para controlar las funcionalidades de los distintos dispositivos utilizados.
3. La integración de los distintos componentes del sistema en la aeronave es un aspecto que ha de realizarse con cuidado, evitando que la propia estructura de la misma entorpezca el correcto funcionamiento de los dispositivos, o que unos interfieran en otros. Algunas configuraciones de montaje pueden dar lugar a

errores que estropean la totalidad de los datos adquiridos, como por ejemplo una mala colocación de la antena GPS.

4. El objetivo de diseñar un sistema basado en la tecnología LIDAR y de pequeñas dimensiones ha hecho necesario el uso una tarjeta de procesamiento del tipo SBC (*Single Board Computer*), con las correspondientes limitaciones que esto conlleva. Éstas usan por lo general tarjetas de memoria SD como unidades de almacenamiento, por lo que la gestión de la memoria ha sido un tema al que prestar especial atención, tanto en cuestiones de velocidad de almacenamiento como de capacidad, dado que la aplicación de adquisición de datos genera un volumen considerable de datos. En futuros desarrollos se espera estudiar otras configuraciones de los dispositivos utilizados, como por ejemplo la utilización de una frecuencia mayor de escaneado en el LD-MRS, para las situaciones que así lo exijan. Esto conllevaría un mayor flujo de datos haciendo que la gestión del almacenamiento sea una cuestión aún más crítica.
5. Para la representación de los MDTs se ha utilizado MATLAB con su lenguaje de programación propio, lo que ha facilitado en gran medida el tratamiento de los datos en forma matricial y su posterior representación. No obstante, sería deseable en desarrollos futuros crear un software de representación utilizando otros lenguajes como pueden ser C/C++ o Java y que permitan mayor portabilidad de las aplicaciones. Una buena opción sería utilizar el *framework Qt* que ofrece una amplia variedad de funciones para el tratamiento de imágenes y gráficos.
6. Dentro del equipo utilizado en el proyecto no se ha contado con dispositivos capaces de estimar la posición con gran precisión, de manera que se pudieran comparar las coordenadas de los puntos de los MDTs generados con otras más precisas. Esto queda pendiente para futuros desarrollos, de manera que se permita realizar un análisis del error que presentan las coordenadas de los MDTs generados. De esto dependerá que los resultados obtenidos en el proyecto sirvan de base para futuras aplicaciones que requieran de una precisión alta en las coordenadas de los MDTs. En los sistemas de este tipo, en los que se integran un conjunto de sensores diversos, es difícil determinar las fuentes de error y su impacto sobre el error del resultado final, el MDT. Un mecanismo para determinar el error es utilizar técnicas de comparación con puntos de control, como la que se describe en (19) utilizando imágenes orientadas capturadas por cámaras.
7. La elección de un dispositivo de navegación y posicionamiento es muy importante en un sistema de estas características. Un GPS no diferencial (como el que se ha utilizado) introduce un error del orden de las unidades de metro en condiciones favorables de medida. La dimensión más susceptible de este error es la altura, observándose en algunos de los MDT generados en los que se sobrevoló la misma superficie más

de una vez una diferencia de altura del orden de metros. El uso de un GPS diferencial reduciría considerablemente estos efectos dado que su precisión mejora hasta el orden de los centímetros.

8. Los dispositivos de navegación se ayudan de modelos físicos terrestres para estimar la posición y otras variables inerciales. El MTi-G utiliza el estándar WGS84 (*World Geodetic System 1984*), cuya precisión se estima cercana al metro. Sería posible mejorar la precisión del MTi-G si se utilizase un modelo local o *datum* de la región en la que se trabaja, dado que son más precisos. El ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) es específico de Europa y más actual que el WGS84 por lo que sería una buena posibilidad a estudiar en futuros desarrollos. No obstante, hay que tener cuidado de no utilizar los *datums* fuera de sus límites de validez porque en ese caso el error cometido aumentaría considerablemente.
9. En el procesamiento de las coordenadas se ha realizado una aproximación basada en la linearización de la superficie terrestre mediante un plano tangente local (*Local Tangent Plane* o LTP), permitiendo así trabajar con los sistemas de coordenadas *n-frame*. Para los vuelos que se han realizado en el ámbito de este proyecto las distancias recorridas por la aeronave en el vuelo de adquisición de datos no han sido grandes y el error introducido por la aproximación ha sido despreciable. Sin embargo, en futuras aplicaciones y usos de este sistema, los vuelos podrían ser de mayor distancia y el error antes comentado no sería ya despreciable. Por lo tanto en un futuro desarrollo de este sistema se espera procesar las coordenadas de manera que la calidad de los MDT generados sigan siendo aceptables cuando en los vuelos se recorran distancias más grandes.
10. Una correcta sincronización entre el MTi-G y el LD-MRS es fundamental. Cuando ésta desaparece los MDTs podrían no representar con exactitud la realidad, dado que las coordenadas de la superficie terrestre que proporciona el LD-MRS en un determinado instante no se asocian a la posición y orientación que la aeronave tenía en ese mismo instante. Para desarrollar un sistema basado en la tecnología LIDAR que sea robusto ante estos efectos conviene profundizar en este aspecto y valorar otros posibles mecanismos de sincronización. En este proyecto ambos dispositivos comparten una zona de memoria en la que el MTi-G mantiene actualizada, con una tasa de refresco elevada, la información de la posición y orientación de la aeronave, pudiendo el LD-MRS acceder a ella cuando lo necesite. Se genera entonces un fichero con los datos adquiridos ya sincronizados, donde las coordenadas de la superficie proporcionadas por el LD-MRS ya están asociadas a la posición y orientación de la aeronave dadas por el MTi-G. Una alternativa sería que cada dispositivo generase independientemente un fichero con sus datos, teniendo una marca temporal inicial como referencia para ambos. Esto permitiría realizar la sincronización en un procesamiento posterior, permitiendo que los procesos software de adquisición de datos fueran mucho más ligeros y adecuados para una tarjeta de procesamiento como la utilizada.

11. Las condiciones meteorológicas han de tenerse en cuenta para la realización de los vuelos de adquisición de datos. Se citan a continuación algunos consejos basados en la experiencia adquirida durante las pruebas de vuelo:
 - Se recomienda volar en días despejados y en zonas con el aire limpio y seco, para que el LD-MRS no encuentre elementos suspendidos en el aire que desvíen los pulsos.
 - Es necesario realizar un primer vuelo de calibración (abordando el mayor rango de maniobras aéreas posibles) para el buen funcionamiento de la unidad de medidas inerciales. La duración de este periodo de calibración dependerá de los requerimientos del dispositivo de navegación con el que se trabaje.
 - Para aprovecharla apertura angular del LD-MRS sin perder densidad de puntos por un exceso de altura se recomienda realizar vuelos a media altura, o en su defecto optar por vuelos de más altura pero sobrevolando varias veces y siguiendo varias direcciones la misma zona. Una mayor densidad de puntos introduce menos errores en la interpolación realizada al representar el MDT.
 - Usar para la representación de los MDTs estaciones de trabajo orientadas al procesamiento gráfico y con gran capacidad de computación permitirá manejar con mayor comodidad el gran volumen de datos que genera una aplicación de este tipo.
12. El sistema diseñado se ha integrado en una aeronave de pequeñas dimensiones la cual, en otros proyectos relacionados, ha sido utilizada como un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). En un desarrollo futuro se espera integrar el sistema diseñado para generar MDTs en el UAV y así programar previamente la trayectoria de vuelo de la aeronave sobre la superficie de terreno de interés, teniendo de esta forma más control sobre el proceso de adquisición de datos, las maniobras de vuelo de la aeronave, la densidad de puntos obtenidos y otros. Sería deseable controlar de manera remota el sistema de adquisición de datos, de manera que sea el usuario el que desde tierra le indique a la aeronave que debe empezar a realizar barridos de la superficie terrestre.
13. Sería deseable también que la aplicación de adquisición de datos y la de procesamiento se realizaran ambas en la tarjeta de procesamiento del sistema y durante el vuelo. Esto podría realizarse mediante dos procesos distintos coordinados por algún mecanismo software, priorizando por supuesto la aplicación de adquisición de datos, que es más crítica. Esto ahorraría tiempo ya que los datos podrían ser representados nada más ser extraídos de la memoria SD de la tarjeta de procesamiento. Otra posibilidad sería no procesar los datos en la tarjeta de procesamiento sino enviarlos directamente a un enlace de comunicaciones en tierra. Esto permitiría tener información acerca de los *scans* en una estación en tierra

casi en tiempo real y procesar y representar las coordenadas sin apenas retardo con respecto al momento en el que fueron adquiridas.

Así termina el último capítulo del presente documento, en el cual se ha pretendido describir el trabajo realizado y plasmar los conocimientos adquiridos, desde el montaje del prototipo de sistema hasta la representación del modelo digital del terreno. Se ha intentado en todo momento seguir un hilo argumental para facilitar la lectura, deteniéndose en los puntos considerados de importancia, pero sin que eso suponga perder el rumbo hacia el objetivo principal, la creación de un prototipo de sistema basado en la tecnología LIDAR para una aeronave de pequeñas dimensiones y con el fin de generar modelos digitales del terreno o MDTs.