

# ÍNDICE

---

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS.....	6
2.1. LIDAR .....	6
2.2. Modelo Digital del Terreno.....	8
2.3. Navegación inercial.....	9
2.4. Sistemas de coordenadas .....	11
2.4.1. Sistema de coordenadas inercial (l-frame).....	11
2.4.2. Sistema de coordenadas ECI (i-frame) .....	11
2.4.3. Sistema de coordenadas ECEF (e-frame).....	12
2.4.4. Sistema de coordenadas de navegación (n-frame) .....	13
2.4.5. Sistema de coordenadas <i>body</i> (b-frame) .....	14
2.5. Transformación de los sistemas de coordenadas .....	14
2.5.1. Traslación en un espacio tridimensional .....	15
2.5.2. Rotación en un espacio tridimensional. Ángulos de Euler .....	16
2.6. GPS ( <i>Global Positioning System</i> ).....	18
2.7. Filtro de Kalman.....	20
CAPÍTULO 3. COMPONENTES DEL SISTEMA .....	22
3.1. LD-MRS 400001 .....	23
3.1.1. Principio de funcionamiento .....	23
3.1.2. Apertura angular .....	24
3.1.3. Proceso de medida .....	26
3.1.4. Sistema de referencia y origen de coordenadas .....	27
3.1.5. Frecuencia de funcionamiento y resolución angular .....	29
3.1.6. Multi-eco .....	30
3.1.7. Alcance de los pulsos .....	31
3.1.8. Conexiones e Interfaz .....	31
3.1.9. Especificaciones técnicas.....	32
3.2. <i>Motion Tracker</i> MTi-G .....	34
3.2.1. Principio de funcionamiento .....	34
3.2.1.1. Filtro de Kalman extendido .....	35
3.2.2. Escenarios .....	38
3.2.3. Sistema de referencia y origen de coordenadas .....	38

3.2.3.1.	Sistema de coordenadas 'S' (MTi-G body fixed) .....	39
3.2.3.2.	Sistema de coordenadas 'G' o de Navegación .....	40
3.2.3.3.	Sistema de coordenadas terrestre elipsoidal .....	42
3.2.4.	Formato de salida de la orientación: Ángulos de Euler .....	44
3.2.5.	Byte de estado .....	44
3.2.6.	Conexiones e Interfaz .....	45
3.2.7.	Factores influyentes en la medida.....	47
3.2.8.	GPS ( <i>Global Positioning System</i> ).....	48
3.2.9.	Especificaciones técnicas.....	48
3.3.	Tarjeta de procesamiento ISIS.....	49
3.4.	Vehículos aéreos.....	50
3.5.	Integración del sistema .....	52
CAPÍTULO 4.	ADQUISICIÓN DE DATOS .....	55
4.1.	Software del MTi-G.....	56
4.1.1.	Main.....	57
4.1.1.1.	Configuración del dispositivo .....	57
4.1.1.2.	Zona de memoria compartida .....	60
4.1.1.3.	Recepción de los paquetes .....	61
4.1.2.	Pseudocódigo .....	62
4.2.	Software del LD-MRS.....	62
4.2.1.	MessageHandler.....	63
4.2.2.	ProcessScan().....	65
4.2.2.1.	Fichero de salida .....	65
4.2.3.	Main.....	69
4.2.3.1.	Zona de memoria compartida .....	69
4.2.3.2.	Configuración del LD-MRS .....	69
4.2.3.3.	Fichero de salida .....	71
4.2.3.4.	Bucle principal .....	72
4.2.4.	Pseudocódigo .....	73
CAPÍTULO 5.	PROCESAMIENTO .....	74
5.1.	Procedimiento de procesamiento .....	76
5.2.	Software de procesamiento .....	81
5.2.1.	Main.....	81
5.2.1.1.	Bucle principal .....	84
5.2.2.	Functions.cpp .....	88

5.2.3. Clases.cpp .....	88
5.2.4. Formato del fichero de salida .....	91
5.2.5. Pseudocódigo .....	94
CAPÍTULO 6. REPRESENTACIÓN .....	95
6.1. Representación individual de <i>scans</i> .....	96
6.2. Representación de un MDT .....	97
6.2.1. Procedimiento de representación de un MDT de superficie .....	107
6.2.2. Imágenes de otros MDT .....	112
6.2.2.1. Aerópolis – Parque Tecnológico Aeroespacial de Andalucía .....	112
6.2.2.2. Alrededores de la pista del club de aeromodelismo RC Saeta .....	115
6.2.3. Pseudocódigo .....	121
6.3. Precisión de los MDT generados .....	121
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....	124
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS .....	129
ANEXO .....	131
AGRADECIMIENTOS .....	143

## FIGURAS

---

Figura 1. Aeronave utilizada en el proyecto .....	2
Figura 2. Algunos MDTs generados con el sistema .....	3
Figura 3. Ejemplo de una aplicación basada en la tecnología LIDAR para generar MDTs.....	7
Figura 4. Modelo Digital del Gran Cañón del Colorado (Arizona, EEUU).....	8
Figura 5. Ejemplo de un MDT generado en este proyecto .....	9
Figura 6. Colocación del dispositivo MTi-G en la aeronave.....	10
Figura 7. Sistema de coordenadas ECI.....	12
Figura 8. Sistema de coordenadas ECEF (13).....	13
Figura 9. Sistema de coordenadas de navegación (13) .....	13
Figura 10. Sistema de coordenadas <i>body</i> (b-frame).....	14
Figura 11. Ángulos Roll, Pitch y Yaw .....	17
Figura 12. LD-MRS 400001 (18) .....	23
Figura 13. Tiempo de vuelo (TOF – Time Of Flight) (18).....	24
Figura 14. Apertura vertical (18).....	25
Figura 15. Apertura horizontal (18) .....	26
Figura 16. Diferencia angular entre medidas horizontales (18) .....	27
Figura 17. Sistema de referencia del LD-MRS.....	28
Figura 18. Origen de coordenadas y posición de los sensores (18).....	28
Figura 19. Resolución angular por sectores (18) .....	30
Figura 20. Ejemplo de multi-eco (18) .....	31
Figura 21. Conexiones (13) .....	32
Figura 22. MTi-G (13).....	34
Figura 23. Arquitectura interna del MTi-G (13).....	35
Figura 24. Sistema de coordenadas ‘S’ o MTi-G <i>Body Fixed</i> (13).....	39
Figura 25. Sistema de coordenadas real (sensores) ‘S’ o MTi-G <i>Body Fixed</i> (13).....	40
Figura 26. Sistema de coordenadas ‘G’ (NWU) (13) .....	41
Figura 27. Rotación de ‘S’ con respecto a ‘G’ (13).....	41
Figura 28. Sistema de coordenadas ECEF (13).....	42
Figura 29. LATITUD, LONGITUD y ALTITUD. Definición según el modelo WGS84 (13).....	43
Figura 30. Byte de estado (13).....	45
Figura 31. Conexiones del MTi-G (13) .....	46
Figura 32. Convertidor ODU L-series (RS-232) a USB (13) .....	46

Figura 33. Tarjeta de procesamiento ISIS de EUROTECH .....	49
Figura 34. Avión radiocontrol Pilatus Porter .....	51
Figura 35. Helicóptero radiocontrol modelo CB 5000 .....	52
Figura 36. Integración del sistema en el avión Pilatus Porter .....	53
Figura 37. Integración del sistema en el helicóptero CB 5000 .....	54
Figura 38. Niveles de programación del MTi-G (13) .....	56
Figura 39. Ejemplo del vector $LeverArm$ para el helicóptero CB 5000 .....	59
Figura 40. Buffer de recepción de mensajes del LD-MRS .....	64
Figura 41. Banderas posibles de cada punto de un scan (18) .....	67
Figura 42. Ejemplo de fichero de salida .....	68
Figura 43. Diagrama UML de la estructura de clases para programar el LD-MRS (18) .....	70
Figura 44. Ejemplo de la estructura de carpetas y ficheros de salida .....	71
Figura 45. Sistema de coordenadas de navegación y linearización de la latitud y la longitud (13) .....	74
Figura 46. Configuración del montaje del sistema diseñado y sistemas de coordenadas <i>b-frame</i> .....	77
Figura 47. Orientación del Mti-G (13) .....	78
Figura 48. Matrices de rotación de los ángulos de Euler .....	79
Figura 49. Linearización de la superficie terrestre y ejemplo del error que introduce (13) .....	80
Figura 50. Estructura de carpetas creada por el código de corrección de datos .....	83
Figura 51. Diferencias entre los sistemas de coordenadas de los dispositivos (izquierda) y primera transformación de las coordenadas al sistema de coordenadas <i>b-frame</i> del MTi-G (derecha) .....	86
Figura 52. Segunda transformación de las coordenadas o corrección de la orientación con respecto al sistema de coordenadas <i>n-frame</i> (izquierda) y tercera transformación o traslación del sistema de coordenadas de navegación <i>n-frame</i> $t_n$ (en cada instante) al sistema de coordenadas de representación <i>n-frame</i> $t_0$ o inicial (derecha) .....	87
Figura 53. Clases del programa de corrección de datos (fichero <i>clases.cpp</i> ) .....	89
Figura 54. Atributos y métodos de la clase <i>scan</i> .....	90
Figura 55. Estructura de las clases que recogen los datos .....	91
Figura 56. Fichero de salida correspondiente al <i>scan 125</i> procesado .....	92
Figura 57. <i>Scan 758</i> corregido de un vuelo de adquisición de datos .....	93
Figura 58. Ejemplo del fichero de salida <i>debug</i> .....	93
Figura 59. Ejemplo del fichero de salida <i>scans</i> .....	94
Figura 60. Ejemplo del fichero de salida <i>lla_eul_vel</i> .....	94
Figura 61. Resultados de la aplicación <i>scan_visor</i> .....	96
Figura 62. Resultados de la aplicación <i>scan_visor</i> .....	97
Figura 63. Menú inicial en línea de comandos de la aplicación <i>scan_grid</i> .....	98
Figura 64. Ejemplo de MDT donde se aprecia el solape de los <i>scans</i> .....	99

Figura 65. Zoom de la imagen anterior para ver el detalle del solape de los <i>scans</i> .....	99
Figura 66. Localización del club de aeromodelismo RC SAETA.....	100
Figura 67. Vista aérea de la pista de aeromodelismo y la casetilla .....	101
Figura 68. Fotografía del terreno donde se llevó a cabo la adquisición de datos (I).....	102
Figura 69. Fotografía del terreno donde se llevó a cabo la adquisición de datos (II).....	102
Figura 70. MDT de la estructura metálica (casetilla) .....	103
Figura 71. Representación del MDT, con detalles de las fotografías anteriores.....	104
Figura 72. Imagen anterior vista desde otra perspectiva .....	105
Figura 73. Representación del MDT con una superficie de distintas características .....	106
Figura 74. Imagen anterior vista desde otra perspectiva .....	106
Figura 75. Representación del MDT usando puntos, detalles de las copas de los árboles .....	107
Figura 76. Conjuntos de puntos del <i>grid</i> homogéneo generado (izquierda) y los procedentes de la adquisición (derecha abajo) .....	108
Figura 77. Valores máximos y mínimos en las direcciones north (verde) y west (naranja) para la generación del <i>grid</i> .....	109
Figura 78. Representación del MDT con más densidad de puntos (I) .....	110
Figura 79. Representación del MDT con más densidad de puntos (II) .....	110
Figura 80. Representación del MDT junto con la trayectoria de la aeronave (I).....	111
Figura 81. Imagen por satélite de la situación de otra prueba de adquisición de datos.....	112
Figura 82. Imagen por satélite de la situación de otra prueba de adquisición de datos (detalle) <sup>8</sup> .....	112
Figura 83. MDT de la calle Juan Olivert perteneciente a AERÓPOLIS y el canal que lo atraviesa .....	113
Figura 84. Fotografía de la calle Juan Olivert (detalle de árbol, farola y papelera).....	114
Figura 85. Detalle del MDT anterior con árbol (rojo), farola (naranja) y papelera (verde) (I).....	114
Figura 86. Detalle del MDT anterior mediante representación por puntos (árbol, farola y papelera) (II) .....	115
Figura 87. Vista aérea de la pista de aeromodelismo y la casetilla .....	116
Figura 88. MDT de la pista de aeromodelismo visto desde arriba .....	117
Figura 89. MDT de la pista de aeromodelismo (I) .....	118
Figura 90. MDT de la pista de aeromodelismo (II) .....	119
Figura 91. MDT de la pista de aeromodelismo junto con la trayectoria de vuelo .....	120

## TABLAS

---

Tabla 1. Frecuencias de trabajo del LD-MRS y resolución angular .....	29
Tabla 2. Especificaciones técnicas del dispositivo LD-MRS .....	33
Tabla 3. Escenarios predefinidos del MTi-G .....	38
Tabla 4. Ángulos Roll, Pitch y Yaw .....	44
Tabla 5. Banderas del Byte de Estado.....	45
Tabla 6. Especificaciones del dispositivo MTi-G .....	49
Tabla 7. Especificaciones de la tarjeta de procesamiento ISIS de EUROTECH .....	50
Tabla 8. Características de la aeronave Pilatus Porter .....	51
Tabla 9. Características del helicóptero CB-5000 .....	51
Tabla 10. Estructura de datos de la zona de memoria compartida.....	58
Tabla 11. Datos requeridos al MTi-G .....	58
Tabla 12. Valores del LeverArm para los dos vehículos aéreos.....	60
Tabla 13. Información general del <i>scan</i> en el fichero de salida .....	66
Tabla 14. Características de los puntos de cada <i>scan</i> .....	67
Tabla 15. Distintas configuraciones de montaje.....	81
Tabla 16. Contadores para el análisis del fichero de entrada .....	82
Tabla 17. Funciones definidas en el fichero <i>functions.cpp</i> .....	88
Tabla 18. Clases y tipos de datos que almacenan .....	89

## SIGLAS

---

**ALS** – Airborne Laser Scanner

**DEM** – Digital Elevation Model

**DSM** – Digital Surface Model

**DTM** - Digital Terrain model

**ECEF** – Earth Centered Earth Fixed

**ECI** – Earth Centered Inertial

**GPS** – Global Positioning System

**INS** – Inertial Navigation System

**LD-MRS** – Laser scanner LD-MRS 400001

**LIDAR** – Light Detection And Ranging

**LTP** – Local Tangent Plane

**MDT** – Modelo Digital del Terreno

**MTi-G** – Xsens Motion Tracker (Inertial Measurement Unit & GPS)

**RADAR** – RAdar Detection And Ranging

**SBC** – Single Board Computer

**TOF** – Time Of Flight (Tiempo de vuelo)

**UAV** – Unmanned Aerial Vehicle