



ETSI
US



Modelado, control y simulación de un quadrotor equipado con un brazo manipulador robótico

Autor: Ricardo Ragel de la Torre
Tutor: Jesús Iván Maza Alcañiz
Aníbal Ollero Baturone

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Sevilla, 17 de septiembre de 2012

Este Proyecto se realizó en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y
Automática

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo y comprensión.

“Sólo en una entidad donde la inteligencia funciona al servicio de una imaginación, no técnica, sino creadoras de proyectos vitales, puede construirse la capacidad técnica”

José Ortega y Gasset

Prefacio

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivos el modelado, control y simulación de diferentes robots en un entorno tridimensional y realista mediante el uso de un software específico para sistemas robóticos, en concreto el meta-sistema operativo ROS (Robot Operating System), formado por un conjunto de programas, herramientas y librerías de programación, todos bajo la licencia de software libre y gratuito. Los robots seleccionados para llevar a cabo estos objetivos han sido un robot aéreo no tripulado y un brazo manipulador, llegando a tratarse un tercer robot formado por la combinación de ambos. Estas elecciones se basan en el auge actual de los robots aéreos no tripulados en una amplia gama de aplicaciones (vigilancia, seguridad, estrategia militar, protección y extinción de incendios, actividades lúdicas, etcétera) y la posibilidad de integrar en ellos los robots más utilizados en la propia industria, los brazos manipuladores.

El PFC se dividirá en una serie de capítulos en los que se irán desarrollando cada uno de los objetivos comentados para cada uno de los robots. En el primer capítulo se hará una muy breve introducción sobre los objetivos, robots seleccionados y el software de simulación utilizado. En el segundo capítulo se abordará el planteamiento teórico necesario para entender como podemos modelar cada uno de los robots, así como el propio modelado tridimensional de cada uno. En el tercero se explicará en profundidad que es, como se estructura y como utilizar el sistema ROS, así como sus herramientas, programas, aplicaciones y paquetes de programación utilizados a lo largo de este proyecto. En el cuarto capítulo se desarrollarán los sistemas de control en posición para cada robot y se realizarán las simulaciones pertinentes para comprobar su buen funcionamiento y obtener conclusiones y posibles mejoras. También se realizará, en el caso del robot manipulador, la planificación del movimiento en el espacio cartesiano para coger o soltar objetos y, en el caso del quadrotor, un programa para el seguimiento de trayectorias en el espacio, simulándose ambos posteriormente. Por último, se brindará un capítulo a las conclusiones obtenidas durante los apartados anteriores y los posibles trabajos futuros que queden abiertos para mejorar los sistemas de control y los simuladores desarrollados.

Por otro lado, se intentará explicar con la mayor claridad posible el modo de empleo de todas las herramientas y aplicaciones que ofrece ROS y que se usen en el proyecto, a fin de que éste pueda servir de apoyo o ejemplo a otros futuros proyectos que lo utilicen.

Índice

Prefacio	I
Índice	III
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	XVII
Lista de Acrónimos	XIX
1 Introducción y objetivos	1
2 Modelado cinemático y dinámico	5
2.1 Modelado del QuadRotor	5
2.1.1 Planteamiento teórico	5
2.1.2 Modelado del caso particular	13
2.2 Modelado del manipulador	28
2.2.1 Planteamiento teórico	28
2.2.2 Modelado del caso particular	33
2.3 Modelado del QuadRotor equipado con el Manipulador	56
2.3.1 Punto de unión y equilibrio de momentos	56
2.3.2 Modelos URDF	61
3 Entorno de simulación ROS/Gazebo	65
3.1 ROS	65

3.1.1	Introducción a ROS	65
3.1.2	Conceptos básicos	67
3.1.3	Aplicaciones y librerías de cliente	82
3.1.4	Herramientas comunes	102
3.2	Gazebo	107
3.2.1	Introducción a Gazebo	107
3.2.2	Configuración y generalidades del entorno de simulación	108
3.2.3	Topics y servicios de Gazebo	112
3.2.4	Plugins para Gazebo	115
4	Control del sistema	119
4.1	Control desacoplado del QuadRotor	119
4.1.1	Estrategia adoptada	119
4.1.2	Resultados de simulación	132
4.1.3	Seguimiento de trayectoria	152
4.2	Control desacoplado del manipulador	157
4.2.1	Estrategia adoptada	157
4.2.2	Resultados de simulación	169
4.2.3	Planificación de trayectorias	178
4.3	Control del Quadrotor equipado con el manipulador	187
4.3.1	Estrategia adoptada	187
4.3.2	Resultados de simulación	190
5	Conclusiones y desarrollos futuros	197
5.1	QuadRotor	197
5.2	Manipulador	198
5.3	QuadRotor equipado con el Manipulador	199
	Apéndices	201
	Apéndice A Plano QuadRotor	203

Apéndice B Códigos de programación - QuadRotor	205
B.1 quadrotor.urdf	205
B.2 display_quad_rviz.launch	213
B.3 display_quad_gazebo.launch	214
B.4 Propiedades_Quad.h	215
B.5 Controlador_Tustin.h	215
B.6 control.cpp	215
B.7 quadrotor_control.launch	225
B.8 arranque.cpp	226
B.9 gen_trayectoria.cpp	227
B.10 seguimiento_trayectoria.launch	230
Apéndice C Sintonización PIDs QuadRotor	233
C.1 PID en altura	233
C.2 PID en roll, pitch y yaw	237
C.3 PID en X e Y	238
Apéndice D Algoritmo Look-Ahead para el seguimiento de trayectorias	241
Apéndice E Plano Manipulador	243
Apéndice F Códigos Manipulador	245
F.1 manipulador.urdf	245
F.2 control_cartesiano_manipulador.h	250
F.3 control_cartesiano_manipulador.cpp	252
F.4 planificación_manipulador.cpp	260
F.5 control_cartesiano_manipulador.launch	272
F.6 man_mesa_gazebo_control_cartesiano.launch	272
Apéndice G Códigos QuadRotor equipado con Manipulador	275
G.1 Propiedades.h	275

G.2 control.cpp	275
G.3 Quad_man_control.launch	277

Bibliografia	279
---------------------	------------

Índice de Figuras

2.1	Esquema estructura del quadrotor	6
2.2	Hovering	7
2.3	Throttle	8
2.4	Roll	8
2.5	Picth	9
2.6	Yaw	9
2.7	Sistemas de Referencia	10
2.8	Ascending Technologies Pelican	14
2.9	Motor AXI 2217/16 GOLD LINE	14
2.10	Modelo visual estructura base quadrotor	16
2.11	Modelo visual motores quadrotor	16
2.12	Modelo visual hélices quadrotor	16
2.13	Sistemas de referencia visual y en el CM	17
2.14	CM estructura base	17
2.15	CM motor	18
2.16	CM hélice	19
2.17	Texturización y exportación	20
	(a) Base sin textura	20
	(b) Base con textura y exportación	20
2.18	Grafo quadrotor_continuous.urdf	21
2.19	Grafo quadrotor.urdf	22
2.20	Comprobaciones QuadRotor en rviz	25

(a)	Escala	25
(b)	Articulaciones	25
(c)	Eslabones	25
2.21	Simulador y visualizadores	26
(a)	Gazebo y Cámara	26
(b)	Rxplot sensor odometría	26
2.22	SR inercial de la Base del Quadrotor	26
2.23	Grafo sistema inicial en Gazebo	27
2.24	Diagrama topics y servicios de interés QuadRotor	27
2.25	Relación simulador QuadRotor con el modelo matemático	28
2.26	Elementos cadena manipulador	28
2.27	Robot tipo articular	29
2.28	Configuración motores	30
(a)	Configuración motores distribuidos	30
(b)	Configuración motores concentrados	30
2.29	Espacio de trabajo	31
2.30	Modelo Cinemático Directo	32
2.31	Modelo dinámico eslabón	33
2.32	Modelo inicial manipulador	34
2.33	Servomotores manipulador	36
(a)	HS-5625MG	36
(b)	HS-5485HB	36
(c)	HS-5065MG	36
(d)	HS-5245MG	36
2.34	Servomotores manipulador	37
(a)	Diagrama manipulador	37
(b)	Diagrama unifilar y SR	37
2.35	Localización SR en el CM	42
(a)	Conjunto Base	42
(b)	Batería	42

(c)	Brazo 1	42
(d)	Brazo 2	42
(e)	Chasis efector	42
(f)	Gancho efector	42
2.36	Conjunto base en Blender	42
2.37	Grafo manipulador.urdf	44
2.38	Condiciones de seguridad controlador	46
(a)	C.S. en velocidad	46
(b)	C.S. en esfuerzo	46
2.39	Modelo manipulador.urdf	47
2.40	TCP en manipulador.urdf	48
2.41	Grafo man_mesa.urdf	48
2.42	Modelo man_mesa.urdf	49
2.43	Comprobación escala manipulador	51
2.44	Localización TCP	52
2.45	Articulación 1	52
(a)	Límite inferior	52
(b)	Límite superior	52
2.46	Articulación 2	52
(a)	Límite inferior	52
(b)	Límite superior	52
2.47	Articulación 3	53
(a)	Límite inferior	53
(b)	Límite superior	53
2.48	Articulación efector	53
(a)	Límite inferior	53
(b)	Límite superior	53
2.49	Articulación bandeja batería	53
(a)	Límite inferior	53
(b)	Límite superior	53

2.50	Espacio de trabajo manipulador	54
2.51	Simulador y visualizadores manipulador	55
2.52	Grafo simulador y visualizadores manipulador	55
2.53	Simulación sin aplicación de fuerzas	56
2.54	SR inerciales en Gazebo	56
2.55	Orientación manipulador respecto al Quadrotor	57
2.56	Base del manipulador alineada con la del quadrotor	58
	(a) Vista del sistema completo	58
	(b) Vista de los SR visuales	58
2.57	Tabla momentos sobre el QuadRotor con ejes Z base alineados	59
2.58	Desplazamiento para anular momentos sobre el Quadrotor . .	60
2.59	Tabla momentos sobre el QuadRotor anulados centrando la carga	61
2.60	Quadrotor equipado con manipulador en Gazebo	63
2.61	Modelo URDF de robot QuadRotor equipado con Manipulador	64
3.1	Relación ROS y SO	66
3.2	Robot PR2	67
3.3	Paquetes	68
3.4	Pilas	68
3.5	Repositorios	68
3.6	Nodos	71
3.7	Topic[1]	73
3.8	Servicio[1]	75
3.9	Master[1]	78
3.10	Ejemplo funcionamiento del Master	79
3.11	URDF: Links y joints	84
3.12	Links	85
3.13	Joints	87
3.14	Limites de seguridad en velocidad	89

3.15	Limites de seguridad en esfuerzo	89
3.16	Funciones miembro clase Controller	96
3.17	Modelo en rviz	103
3.18	rviz y joint_state_publisher	104
3.19	rxplot	105
3.20	rxgraph	105
3.21	rxconsole	106
3.22	Gazebo empty.world	110
3.23	Modelo simple en Gazebo	111
3.24	Manipulación directa de objetos	111
3.25	Topics y servicios de Gazebo	112
4.1	Primer nivel de control	119
4.2	Segundo nivel de control	120
4.3	Sistemas de referencia control	121
4.4	Relación X e Y con r y p	122
4.5	Transformación entre los SR	123
4.6	Fuerzas y momentos sobre el QuadRotor	125
4.7	Modificación del yaw	126
4.8	Grafo control Quadrotor	128
4.9	Controlador en altura	129
4.10	Controlador en roll	130
4.11	Controlador en pitch	130
4.12	Controlador en yaw	131
4.13	Controlador en X	131
4.14	Controlador en Y	132
4.15	Comprobación lecturas de giros	134
	(a) Eliminación gravedad y selección del QuadRotor	134
	(b) Modificación de angulos a través de la interfaz	134
4.16	Quadrotor simulación en altura	135

4.17	Simulación en altura - Respuesta en Z	135
4.18	Simulación en altura - Respuesta Velocidades de giro	136
4.19	Simulación en altura - Influencia en X e Y	136
4.20	Simulación en altura - Respuesta en Z	137
	(a) Arranque	137
	(b) Arranque y modificaciones	137
4.21	Simulación en altura - Velocidades de giro	138
4.22	Simulación en altura - Influencia en X e Y	138
4.23	Simulación en roll	139
	(a) Quadrotor	139
	(b) Quadrotor con SR	139
4.24	Simulación en roll - Respuesta en r	139
4.25	Simulación en roll - Respuesta en r	140
4.26	Simulación en roll - Velocidades de giro	140
4.27	Simulación en roll - Influencia sobre X,Y,Z	141
4.28	Simulación en pitch	141
	(a) Quadrotor	141
	(b) Quadrotor con SR	141
4.29	Simulación en pitch - Respuesta en p	142
4.30	Simulación en pitch - Velocidades de giro	142
4.31	Simulación en pitch - Influencia sobre X,Y,Z	143
4.32	Simulación en yaw	143
4.33	Simulación en yaw - Respuesta en y	144
4.34	Simulación en yaw - Velocidad de giro	144
4.35	Simulación en yaw - Influencia sobre X,Y,Z	145
4.36	Simulación incremento en X	146
	(a) Respuesta en X e Y	146
	(b) Respuesta en roll y pitch	146
4.37	Simulación incremento en X	147
	(a) Velocidades de giro de los motores	147

(b)	Efectos sobre la altura y yaw	147
4.38	Simulación incremento en Y	148
(a)	Respuesta en X e Y	148
(b)	Respuesta en roll y pitch	148
4.39	Simulación incremento en X e Y	149
(a)	Respuesta en X e Y	149
(b)	Respuesta en roll y pitch	149
4.40	Simulación incremento en X e Y	150
(a)	Velocidades de giro de los motores	150
(b)	Efectos sobre la altura y yaw	150
4.41	Desplazamiento para yaw no nulo	151
4.42	Simulación yaw no nulo - Respuesta en Z y yaw	151
4.44	Simulación yaw no nulo - Respuesta en roll y pitch	151
4.43	Simulación yaw no nulo - Respuesta en X e Y	152
4.45	Grafo seguimiento de trayectorias	152
4.46	Trayectoria	153
4.47	Trayectoria en 2D	153
(a)	Trayectoria Y-X	153
(b)	Trayectoria Z-X	153
4.48	Seguimiento trayectoria en X,Y,Z	154
4.49	Errores de seguimiento	154
4.50	Velocidades de giro en seguimiento	155
4.51	Estructura control articular	158
(a)	Estructura de control: articulaciones 1, 2 y 3	158
(b)	Estructura de control: efector	158
4.52	Objetos y funciones control articular	159
4.53	Variables Control Cartesiano	164
4.54	Estructura Control Cartesiano	165
4.55	Objetos y funciones Control Cartesiano	165
4.56	Cadena cinemática	167

4.57 Grafo simulaciones control articular	170
4.58 Simulación - articulación 1	171
(a) 0 rad	171
(b) 0.2 rad	171
4.59 Respuesta articulación 1	171
4.60 Efecto articulación 1	172
4.61 Simulación - articulación 2	172
(a) 0 rad	172
(b) - 0.2 rad	172
4.63 Efecto articulación 2	172
4.62 Respuesta articulación 2	173
4.64 Simulación - articulación 3	173
(a) 0 rad	173
(b) 0.3 rad	173
4.65 Respuesta articulación 3	174
4.66 Simulación - articulación efector	174
(a) Apertura	174
(b) Cierre	174
4.67 Respuesta articulación efector	175
4.68 Grafo simulaciones control cartesiano	175
4.69 Simulación - Control Cartesiano	176
(a) Inicial	176
(b) Final	176
4.70 Respuesta en Y y Z	177
4.71 Posiciones articulares	177
4.72 Comprobación de la resolución del problema CI	178
4.73 Diagrama inclusión de la planificación	179
4.74 Posición de aproximación orientada y Volumen de Seguridad	179
4.75 Trayectoria para la segunda situación	181
4.76 Grafo sistema en ROS para planificación	184

4.77 Simulación - Planificación	185
(a) Barra a coger	185
(b) PAT	185
(c) PAO	185
(d) Apertura efector	185
(e) Posición Objetivo	185
(f) Cierre efector	185
(g) Posición inicial	185
(h) PAO y orientación	185
(i) Posición a soltar	185
(j) Apertura y PAO	185
4.78 Posición del TCP durante la simulación con planificación . . .	186
4.79 Sistema de control del Quadrotor equipado con el brazo ma- nipulador	187
4.80 Reacciones sobre el QuadRotor	188
(a) Reacción al par de la articulación 1	188
(b) Reacción al par de la articulación 2	188
4.81 Cálculo contra-reacciones	189
(a) Descomposición pares articulaciones	189
(b) Reacción y contra-reacciones	189
4.82 Simulación Quadrotor con manipulador fijo	191
(a) Respuesta en XYZ	191
(b) Velocidades de giro de los motores	191
4.83 Efecto sobre roll y pitch de una variación en yaw	192
4.84 Sin contrarrestar reacciones - Respuesta en XYZ	193
4.85 Sin contrarrestar reacciones - Respuesta rpy	193
4.86 Sin contrarrestar reacciones - Reacciones sobre el QuadRotor	193
4.87 Contrarrestando las reacciones - Respuesta en XYZ	194
4.88 Contrarrestando las reacciones - Respuesta en rpy	194
4.89 Contrarrestando las reacciones - Velocidades de hovering . . .	195

4.90	Contrarrestando las reacciones - Velocidades de giro	195
4.91	Contrarrestando las reacciones - Trayectorias TCP manipulador	196
C.1	Sistema Z-N en BC para Z	233
C.2	Oscilaciones mantenidas en Z	234
C.3	Sistema controlado con PID de Z-N	234
C.4	Respuesta en Z para PID de Z-N	235
C.5	Sistema controlado con PID paralelo	236
C.6	Respuesta en Z primera sintonización	236
C.7	Respuesta en Z segunda sintonización	237
C.8	Sistema Z-N en BC para roll	237
C.9	Oscilaciones mantenidas en roll	238
C.10	Sistema controlado con PID de Z-N	238
C.11	Método de Z-N para X e Y	239
	(a) $K_p = 0.015$	239
	(b) $K_p = 0.03$	239
	(c) $K_p = 0.13$	239
D.1	Trayectoria	241
	(a) Trayectoria Y-X	241
	(b) Trayectoria Z-X	241
D.2	Seguimiento Look-Ahead	242

Índice de Tablas

2.1	Ángulos límites articulaciones	36
2.2	Parámetros D-H	37
3.1	Equivalencia de tipos de datos	77
3.2	APIs para C++	82
4.1	Equivalencia de tipos de datos	120
4.2	Sintonización PIDs manipulador	163
C.1	Método de Z-N en bucle cerrado	234

Lista de Acrónimos

ROS	Robot Operating System
URDF	Unified Robot Description Format
SE	Solid Edge
CM	Centro de masa
SR	Sistema de referencia
gdl	Grados de libertad
TPC	Tool Center Point
D-H	Denavit-Hartenberg
MTH	Matrices de transformación homogénea
SO	Sistema Operativo
API	Application Programming Interface
TR	Tiempo real
GUI	Interfaz gráfica de usuario
SP	Servidor de Parámetros
RPY	Roll, pitch, yaw
BC	Bucle cerrado
CD	Cinemática directa
CI	Cinemática inversa
PAO	Posición de aproximación orientada
PAT	Posición de aproximación por tangente

