

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	31
1.1 Introducción	31
1.2 Objetivos de la tesis	32
1.3 Estructura de la tesis	33
2. Estado del arte	35
3. Relaciones cinemáticas en vehículos con ruedas	39
3.1 Introducción	39
3.2 Supuestos considerados	42
3.3 Relaciones cinemáticas	44
3.3.1 Sistemas de coordenadas	44
3.3.2 Obtención de la velocidad de deslizamiento de rueda	46
3.3.3 Particularización de la ecuación de rueda	49
3.3.4 Matriz Jacobiana de rueda	50
3.4 Ecuación compuesta	52
3.5 Ruedas especiales	54
3.5.1 Rueda <i>doble</i> y rueda <i>castor doble</i>	54
3.5.2 Rueda <i>tipo bola</i>	58
3.5.3 Rueda <i>ortogonal</i>	59
3.6 Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	61

3.A1	Coincidencia instantánea	62
4.	Modelado cinemático de vehículos con ruedas sin deslizamiento	65
4.1	Introducción	65
4.2	Modelado y caracterización con espacio nulo	67
4.3	Modelado y caracterización con rangos	69
4.4	Modelado y caracterización con matrices Jacobianas de rueda	70
4.4.1	Problema cinemático directo	72
4.4.2	Problema cinemático inverso	73
4.4.3	Solución inversa accionada	75
4.4.4	Árbol de accionamiento	77
4.4.5	Solución directa sensorizada	79
4.4.6	Árbol de sensorización	80
4.4.7	Discusión del método de matrices Jacobianas de rueda	82
4.4.8	Demostraciones para el método de matrices Jacobianas de rueda	84
4.5	Solución cinemática ampliada	95
4.6	Modelado y caracterización del vehículo triciclo	96
4.7	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	102
5.	Modelos cinemáticos de vehículos y transmisión de errores	103
5.1	Introducción	103
5.2	Restricciones al movimiento	105
5.3	Obtención de las cinco clases de vehículos	107
5.3.1	Demostración de las implicaciones de (5.9)	110
5.4	Transmisión de errores en los modelos cinemáticos: Isotropía	113
5.5	Caracterización de las cinco clases de vehículos	117
5.5.1	Tipo 1 (3,0): Vehículo omnidireccional	117

5.5.2	Tipo 2 (2,0): Vehículo diferencial	122
5.5.3	Tipo 3 (2,1): Vehículo con una rueda <i>orientable</i>	129
5.5.4	Tipo 4 (1,1): Vehículo triciclo y bicicleta	135
5.5.5	Tipo 5 (1,2): Vehículo con dos ruedas <i>orientables</i>	138
5.6	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	141
6.	Singularidad de los modelos cinemáticos de vehículos	143
6.1	Introducción	143
6.2	Reformulación de ecuaciones	145
6.3	Problemática de la singularidad	147
6.4	Caracterización de la singularidad	149
6.5	Singularidad de los cinco tipos de vehículos	154
6.5.1	Tipo 1: Vehículo omnidireccional	154
6.5.2	Tipo 2: Vehículo diferencial	156
6.5.3	Tipo 3: Vehículo con una rueda <i>orientable</i>	156
6.5.4	Tipo 4: Vehículo triciclo y bicicleta	156
6.5.5	Tipo 5: Vehículo con dos ruedas <i>orientables</i>	160
6.6	Extensión de la caracterización de la singularidad	161
6.7	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	162
7.	Modelado cinemático de vehículos con ruedas con deslizamiento ...	163
7.1	Introducción	163
7.2	Modelado dinámico de vehículos con ruedas	168
7.3	Modelos de tracción (fuerzas de fricción en las ruedas)	173
7.4	Modelos con deslizamiento	179
7.4.1	Modelo del movimiento quasi-estático	179
7.4.2	Modelo cinemático con deslizamiento	181
7.4.3	Uso práctico del modelo cinemático con deslizamiento ...	183

7.4.4	Solución de Mínimos Cuadrados ponderada del modelo cinemático	185
7.5	Simulación y resultados experimentales	187
7.5.1	Carretilla industrial (triciclo)	187
7.5.2	Estimación del vector de velocidad del vehículo con el Filtro de <i>Kalman</i>	190
7.5.3	Resultados de simulación	192
7.5.4	Resultados experimentales	198
7.6	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	206
7.A1	Fórmulas de <i>Pacejka</i> utilizadas en la simulación	208
8.	Control cinemático de vehículos con ruedas	213
8.1	Introducción	213
8.2	Esquema global del control del vehículo	217
8.3	Control de posición	219
8.4	Modelo cinemático inverso de rueda	221
8.4.1	Rueda <i>orientable</i> sin ruedas <i>fijas</i>	221
8.4.2	Rueda <i>fija</i> y particularización de rueda <i>orientable</i>	222
8.4.3	Rueda <i>castor</i>	224
8.4.4	Rueda <i>sueca</i>	224
8.5	Tipos de referencias posibles para cada tipo de vehículo	226
8.5.1	Introducción	226
8.5.2	Vehículo tipo 1: Omnidireccional	229
8.5.3	Vehículo tipo 2: Diferencial	229
8.5.4	Vehículo tipo 4: Triciclo y bicicleta	230
8.5.5	Vehículo tipo 3 (una rueda <i>orientable</i>) y tipo 5 (dos ruedas <i>orientables</i>)	231
8.5.6	Resumen de tipos de referencias posibles	232
8.6	Aplicación del control al caso del triciclo	234

8.6.1	Particularización del control	234
8.6.2	Resultados de simulación	235
8.6.3	Resultados con carretilla industrial	239
8.6	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	243
9.	Aplicaciones para el control cinemático de vehículos con ruedas ...	245
9.1	Introducción	245
9.2	Seguimiento de línea por vision	247
9.2.1	Posicionamiento por visión	247
9.2.2	Control cinemático para el seguimiento de línea por visión	262
9.2.3	Resultados del seguimiento de línea por visión	263
9.3	Planificador de aparcamiento	268
9.3.1	Introducción	268
9.3.2	Planificador de aparcamiento en línea	269
9.3.3	Resultados del planificador en simulación	278
9.4	Resultados más relevantes y conclusiones del capítulo	283
10.	Conclusiones y trabajos futuros	285
10.1	Conclusiones	285
10.2	Trabajos futuros	287
	Bibliografía	289