

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT
ARTICULADO QUE EMULA MODELOS
ANIMALES: APLICACIÓN A UN GUSANO**

19 de febrero de 2003

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Encuadre	1
1.1.1. Robótica, Robots y sus diferentes tipos	1
1.1.2. Robots animales	6
1.1.3. Robots sin patas	10
1.1.4. Estado del arte	11
1.2. Motivación	14
1.3. Objetivos	18
1.4. Organización del tomo	19
I Teoría	20
2. Propagación de perturbaciones	21
2.1. Introducción	21
2.2. Clasificación de las perturbaciones	21
2.3. Ondas transversales unidimensionales (O.T.U)	25
2.3.1. Propagación	25
2.3.2. Propagación de una O.T.U sin amortiguamiento	28
2.4. O.T.U periódicas y sin amortiguamiento	28
2.4.1. Parámetros importantes	29
2.4.1.1. Longitud de onda (λ)	29
2.4.1.2. Periodo (T)	29
2.4.1.3. Velocidad de propagación (v)	31
2.4.2. Formulación	31
2.5. Ondas sinusoidales	31
2.5.1. Fórmulas	31
2.5.2. Superposición de ondas sinusoidales	32
2.5.3. Ondas sinusoidales longitudinales	32
2.6. Resumen	33

3. Mecanismos de movimiento I:	
Gusano longitudinal	35
3.1. Introducción	35
3.2. Modelo de gusano longitudinal	35
3.2.1. Parámetros de modelado	35
3.2.1.1. Parámetros de los segmentos	36
3.2.1.2. Parámetros del gusano	37
3.2.2. Caracterización	38
3.2.2.1. Caracterización de los segmentos	38
3.2.2.2. Caracterización del gusano	38
3.2.3. La función de contorno	39
3.2.4. Secuencias y evolución de los estados	40
3.3. Caracterización del movimiento de avance	40
3.3.1. Definición de avance	40
3.3.2. Un gusano longitudinal que avanza	41
3.3.3. Las tres reglas del avance	43
3.4. Modelo de evolución: propagación de ondas	44
3.5. Condiciones externas	45
3.5.1. Objetivos	45
3.5.2. Definiciones	46
3.5.3. Regla de no retroceso	47
3.6. Condiciones internas	48
3.6.1. Objetivos	48
3.6.2. Regla de avance	48
3.6.3. La función de contorno triangular	52
3.6.3.1. Presentación	52
3.6.3.2. Demostración	52
3.6.3.3. Definiciones	53
3.7. Estudio del avance	54
3.7.1. Recapitulación de resultados	54
3.7.2. Función de contorno no periódica	54
3.7.3. Función de contorno periódica	55
3.8. Implementación física de gusanos longitudinales	59
3.9. Resumen	59
4. Mecanismos de movimiento II:	
Gusano transversal	61
4.1. Introducción	61
4.2. Modelo de gusano transversal	61
4.2.1. Parámetros de modelado	61
4.2.1.1. Articulaciones	62
4.2.1.2. Parámetros del gusano	67
4.2.2. Caracterización	68

4.2.3. Función de contorno	70
4.3. Relación con el modelo de gusano longitudinal	72
4.3.1. Modelo continuo	72
4.3.2. Modelo discreto	73
4.4. Gusano transversal y reglas de avance	74
4.4.1. Modelo de evolución: propagación de ondas	74
4.4.2. Condiciones externas	76
4.4.3. Condiciones internas	77
4.4.3.1. Modelo continuo	77
4.4.3.2. Modelo discreto	79
4.5. Estudio del avance	83
4.5.1. Función de contorno no periódica	83
4.5.2. Función de contorno periódica	84
4.6. Implementación de gusanos transversales	84
4.7. Resumen	85
5. Gusano transversal: algoritmo de ajuste	86
5.1. Introducción	86
5.2. Planteamiento del problema	86
5.2.1. Simplificaciones	88
5.2.2. Problema de ajuste para un segmento	89
5.3. Estudio de alternativas	91
5.3.1. Solución analítica	91
5.3.2. Solución numérica	92
5.4. El algoritmo de ajuste	93
5.4.1. Propagación del algoritmo de ajuste	93
5.4.2. Aplicación a una articulación	93
5.4.3. Sentido de rotación inicial	96
5.4.4. El ángulo inicial de ataque	96
5.4.5. Pasos del algoritmo	97
5.5. Resumen	98
6. Mecanismos de movimiento III: giros	99
6.1. Introducción	99
6.2. Gusano plano rígido	99
6.2.1. Introducción	99
6.2.2. Parámetros	99
6.2.3. Caracterización	100
6.2.4. Función de trayectoria	102
6.2.5. Evolución de los estados de orientación	103
6.3. Gusano plano contráctil	104

6.3.1. Introducción	104
6.3.2. Parámetros	104
6.3.3. Caracterización	105
6.3.4. Avance y coordinación	106
6.4. Gusano tridimensional	107
6.4.1. Introducción	107
6.4.2. Articulaciones de doble estado	107
6.4.3. Parámetros	107
6.4.4. Caracterización	109
6.4.5. Relación con el gusano plano	109
6.5. Algoritmo de giro	109
6.5.1. Planteamiento del problema	109
6.5.2. Pasos del algoritmo	110
6.6. Implementación de gusanos tridimensionales	112
6.7. Resumen	112

II Implementación de un gusano transversal 115

7. Software: modelo virtual	116
7.1. Introducción	116
7.2. Herramientas software	116
7.3. Descripción de la aplicación <code>cube-virtual</code>	117
7.4. Arquitectura software	118
7.4.1. Módulo <code>calc</code>	118
7.4.2. Módulo <code>func</code>	121
7.4.3. Módulo <code>cube</code>	122
7.4.4. Módulo <code>vectores</code>	124
7.4.5. Módulo <code>video</code>	126
7.4.6. Módulo <code>interfaz</code>	127
7.4.7. Programa principal: <code>cube_virtual</code>	127
7.5. Manejo del programa	128
7.5.1. Descripción del interfaz	128
7.5.2. La pantalla de vídeo	128
7.5.3. Estado de las articulaciones	131
7.5.4. Botones del interfaz	131
7.5.5. Interfaz para conversiones	138
7.5.6. Generación de secuencias	138
7.6. Gusano virtual y gusano físico	140
7.6.1. El estado del gusano virtual	140
7.6.2. El estado del gusano físico	140
7.6.3. Conversiones entre los estados	140
7.7. Estados y niveles de control	143

7.8. Resumen	144
8. Estructura mecánica	145
8.1. Introducción	145
8.2. Descripción de los prototipos	145
8.2.1. Primer prototipo: cube-1.0	145
8.2.2. Segundo prototipo: cube-2.0	146
8.3. Servomecanismo futaba 3003	146
8.4. Modelo mecánico	148
8.4.1. Cabeza	148
8.4.2. Cola	150
8.4.3. Cuerpo	150
8.4.3.1. Módulos básicos	150
8.4.3.2. Articulaciones de doble eje	153
8.5. Construcción de Cube	155
8.6. Resumen	159
9. Electrónica	161
9.1. Introducción	161
9.2. Requisitos	161
9.3. Alternativas de diseño	162
9.4. Arquitectura hardware	164
9.5. Tarjetas CT6811 y BT6811	165
9.5.1. Características	165
9.5.2. Descripción	166
9.5.3. Interconexión de las tarjetas	169
9.6. Red de microcontroladores: spinet	170
9.6.1. Arquitectura software	170
9.6.2. Servicios ofrecidos por la spinet	171
9.7. Adaptación a la estructura mecánica	171
9.8. Alimentación	173
9.9. Resumen	175
10. Software: gusano físico	176
10.1. Introducción	176
10.2. Descripción	176
10.3. Servos y secuencias	178
10.3.1. Control de los servos	178
10.3.2. Secuencias	178
10.3.2.1. Parámetros temporales	178
10.3.2.2. Estimación del tiempo de tránsito	180
10.4. Arquitectura software	181
10.4.1. Módulo spinet	182

10.4.2. Módulo vectores	183
10.4.3. Módulo secuencias	183
10.4.4. Módulo interface	184
10.4.5. Programa principal cube-fisico	184
10.5. Manejo del programa	184
10.5.1. Descripción del interfaz de usuario	184
10.5.2. Menú	186
10.5.3. Movimiento de los servos	186
10.5.4. Vector de estado físico	187
10.5.5. Control de secuencias	188
10.5.6. General	189
10.5.7. Manejando las articulaciones	190
10.5.8. Reproducción de secuencias	190
10.5.9. Generación de secuencias	190
10.6. Resumen	191
11. Conclusiones y líneas futuras	192
11.1. Conclusiones	192
11.2. Líneas futuras	197
A. Listado de piezas y materiales de Cube-2.0	198
B. Características de Cube-2.0	200
C. Programas para el 68hc11	201
C.1. Programa maestro	201
C.2. Programa esclavo	204
D. Álbum de fotos	212

Índice de figuras

1.1. Brazo robot industrial, de la marca ASEA.	2
1.2. Vista lateral del robot Asimo creado por Honda	3
1.3. Vista frontal de Asimo.	4
1.4. Concurso de luchadores de sumo celebrado en la UPC, 2000	5
1.5. Izquierda: Concurso de limpiadores de superficie, UPC, 2000. Derecha: Robot de sumo Tauro-viper.	5
1.6. Vehiculo MICROROVER analizando la roca “yogi” en Marte	6
1.7. Prototipo del MICROROVER en los laboratorios de la NASA	7
1.8. Dos robots hexápodos muy simples	7
1.9. AIBO, el “Perro” robot de Sony	8
1.10. PUCHOBOT, un perro robot desarrollado por Andrés Prieto-Moreno Torres	9
1.11. Una hormiga y una cucaracha	10
1.12. Un robot serpiente diseñado en la Nasa	11
1.13. Dibujos del robot serpiente de la Nasa. Derecha: se ha fragmentado para explorar un entorno. Izquierda: La serpiente está trepando por una estructura compleja.	12
1.14. Robot serpiente desarrollado en el GMD.	13
1.15. La serpiente del GMD atravesando un obstáculo	13
1.16. Distintos prototipos de serpiente del Dr. Gavin Miller	14
1.17. El Dr. Gavin Miller con su creación.	14
1.18. Robot serpiente del Mita Lab, en Japón.	15
1.19. Tarjetas comercializadas por Microbótica, S.L	16
1.20. Diferentes microbots desarrollados por Microbótica	16
1.21. El microbot Tritt	17
1.22. Los microbots Puchó y Cube-1.0	17
2.1. Tipos de propagación de perturbaciones	22
2.2. El efecto del amortiguamiento en una perturbación unidimensional	23
2.3. Propagación longitudinal y transversal	24
2.4. Movimiento ondulatorio periódico y no periódico	24
2.5. Propagación de una perturbación transversal y unidimensional	26
2.6. Propagación de una onda transversal y unidimensional, con amortiguamiento	27
2.7. Un gusano corto y uno largo que son recorridos por ondas transversales de la misma amplitud	28

2.8. Concepto de longitud de onda.	29
2.9. La onda $P(x,t)$ dibujada para cuatro instantes de tiempo diferentes y sólo en el intervalo $[0, \lambda]$	30
2.10. Concepto de periodo	30
2.11. Una onda sinusoidal, en el intervalo $x \in [0, \lambda]$	32
2.12. Un sistema por el que se propagan ondas longitudinales	33
3.1. Gusano longitudinal de cinco segmentos	36
3.2. Parámetros estáticos y dinámicos de un segmento i.	37
3.3. Parámetros estáticos y dinámicos de un gusano	38
3.4. Gusano longitudinal con un vector de estado de $(A, 0, 0, 0, 0)$	39
3.5. Una función de contorno triangular y el estado del gusano	40
3.6. Un ejemplo de avance de un gusano longitudinal una distancia D	41
3.7. Un gusano longitud que avanza, con sus vectores de estado en ciertos instantes	42
3.8. Gusano que evoluciona de una manera incorrecta, por lo que no avanza	43
3.9. Gusano que no avanza porque no se cumple la condición externa adecuada	43
3.10. Propagación de la función de contorno	45
3.11. Movimiento de un gusano similar a una lombriz de tierra	46
3.12. Un gusano en un instante t con los segmentos 1 y 2 activos	47
3.13. Gusano de tres segmentos que avanza, en el que se ve la evolución de los puntos de apoyo	49
3.14. Evolución de la contracción total del gusano de la figura 3.11.	50
3.15. Función de contorno que no cumple la regla de avance	51
3.16. Función de contorno cuadrada	51
3.17. Función de contorno que cumple la proposición de avance	52
3.18. La función de contorno triangular al desplazarse cumple la proposición de avance.	53
3.19. Distancia recorrida por la función de contorno, desde el estado inicial hasta el final	54
3.20. Avance de un gusano de cuatro segmentos	56
3.21. Función de contorno periodica	56
3.22. Contracción cuando la función de contorno es periódica	56
3.23. Función de contorno periódica con longitud de onda $N+1$	57
3.24. Nueva contracción cuando la longitud de onda es $N+1$	58
3.25. Función de contorno periódica con longitud de onda N	58
3.26. Nueva contracción cuando la longitud de onda es N	58
4.1. Modelo de gusano transversal con 5 segmentos y 6 articulaciones	62
4.2. Elementos de una articulación	62
4.3. Articulaciones con distintos estados y diferentes orientaciones	64
4.4. Dos articulaciones representadas mediante su vector interior y exterior.	65
4.5. Segmento exterior y segmento interior	65
4.6. Diferentes valores de θ en una articulación	66
4.7. Parámetros estáticos del gusano transversal.	67

4.8. Parámetros dinámicos de un gusano transversal	68
4.9. Gusano en diferentes estados	69
4.10. Una función de contorno sinusoidal y el estado del gusano que determina	70
4.11. Concepto de zona activa de la función de contorno	71
4.12. Diferencia entre ZA y ZAG	71
4.13. Gusano transversal y su gusano longitudinal asociado	73
4.14. Relación entre un gusano longitudinal y uno transversal.	74
4.15. Propagación de la función de contorno	75
4.16. Gusano transversal y longitudinal generado junto con los puntos de apoyo candidatos.	76
4.17. Gusano transversal discreto y puntos de apoyo	77
4.18. Propagación de la función de contorno y los diferentes estados que provoca en el gusano transversal y longitudinal asociado	78
4.19. Comparación de dos funciones de contorno que recorren el mismo gusano utilizando el parámetro VLP	80
4.20. Función de contorno que produce una VLP del 2 %	82
4.21. La contracción NO se mantiene constante	82
4.22. Función de contorno incorrecta. El perímetro es más grande que la longitud del gusano.	83
4.23. Función de contorno periódica, con longitud de onda igual a la zona activa mas la longitud del gusano	84
4.24. Más de una perturbación recorriendo el gusano	84
5.1. Fundamentos de la generación de una secuencia	87
5.2. Algoritmo genérico para generar una secuencia de M estados	88
5.3. Problema del ajuste	89
5.4. Aplicación iterativa del ajuste de una articulación	90
5.5. Problema de ajuste aplicado a un gusano de 1 segmento y dos articulaciones	91
5.6. Calculo del punto final como intersección de $F(x)$ con una circunferencia	92
5.7. Una función de error ejemplo, generada con el programa kplot	94
5.8. Propagación del algoritmo de ajuste	95
5.9. Algoritmo de ajuste	96
5.10. Ángulo inicial	97
6.1. Un gusano plano rígido	100
6.2. Un gusano plano rígido en diferentes estados	101
6.3. Gusano plano rígido con un estado diferente de la articulación de la cola	101
6.4. Gusano avanzando por una función de trayectoria	102
6.5. Función trayectoria propagándose por un gusano	103
6.6. Gusano plano contráctil de 5 articulaciones y 4 segmentos	104
6.7. Un gusano plano con un vector de estado de $[(A,0,0,0),(0,0,30,0,0)]$	105
6.8. Un gusano plano describiendo una función de trayectoria	106
6.9. Ejemplo de generación de los vectores de estado $E_c(t)$ y $E_o(t)$	108

6.10. Articulacion de doble estado	109
6.11. Gusano tridimensional y su proyección	110
6.12. Etapas para la generación de secuencias de movimiento de un gusano tridimensional sobre plano xy	111
6.13. Función de trayectoria simple y gusano en estado inicial y final	112
6.14. Algoritmo de avance para una trayectoria simple	113
7.1. Entorno software desarrollado para cube	117
7.2. Aspecto del programa cube-virtual	119
7.3. Módulos del programa <i>cube-virtual</i>	120
7.4. Estructura de datos empleada para modelar el gusano	122
7.5. Diferentes partes del interfaz del programa <i>cube_virtual</i>	129
7.6. La pantalla de vídeo	130
7.7. Estado de las articulaciones	130
7.8. Grupos de botones en el interfaz	131
7.9. Las tres funciones de contorno empleadas	134
7.10. Secuencia de 4 estados	136
7.11. Propagación del estado hacia la ezquierda y la derecha	137
7.12. Gusano en un estado alcanzado “manualmente”	137
7.13. Gusano enganchado a una función de contorno a la que se le varía la amplitud	139
7.14. Interfaz para las correcciones del estado	139
7.15. Gusanos con diferente estado de la articulacion 1	141
7.16. Articulaciones virtuales y servos reales	142
7.17. Los tres niveles de control del gusano	143
8.1. Primera version del gusano: cube-1.0	146
8.2. Foto de Cube 2.0	147
8.3. Foto con las estructuras mecánicas de Cube 1.0 y Cube 2.0	147
8.4. Foto de un servo modelo futaba 3003	148
8.5. Planta y alzado de Cube	149
8.6. Foto de la estructura de cube	149
8.7. Diferentes vistas de la cabeza de Cube	150
8.8. La cabeza vista en perspectiva	151
8.9. Diferentes vistas de la cola de Cube	151
8.10. La cola de Cube vista en perspectiva	152
8.11. Módulo básico, en diferentes vistas	152
8.12. Módulo básico visto en perspectiva	153
8.13. Diferentes vistas de una articulación con doble eje	154
8.14. Construcción de la pieza con falso eje	154
8.15. Todas las piezas necesarias para construir Cube-2.0	156
8.16. Aspecto de la articulación de doble eje una vez montada	157
8.17. Rueda del futaba, con los taladros que hay que realizar	158
8.18. Paso 6 del montaje	158

8.19. Paso 7: Unión de los módulos básicos.	159
8.20. Estructura final de Cube-2.0, sin la electrónica	160
9.1. Alternativa 1: PC + electrónica por el puerto paralelo	162
9.2. Alternativa 2: PC + microcontrolador por puerto serie	163
9.3. Alternativa 3: Red de micrонтroladores, conectada al PC por puerto serie	164
9.4. Arquitectura hardware	165
9.5. Las tarjetas CT6811 y BT6811	166
9.6. Elementos de la tarjeta CT6811	167
9.7. Elementos de la tarjeta BT6811	168
9.8. Interconexión de las tarjetas CT6811 y BT6811 en Cube	169
9.9. Arquitectura software de la spinet	170
9.10. La estructura mecánica y la electrónica de cube.	172
9.11. Situación de la electrónica y las pilas en Cube	173
9.12. Gusano final, con las principales interconexiones	174
10.1. Aspecto del programa cube-fisico	177
10.2. Gráfica de conversión entre grados y grados futaba	178
10.3. Ejemplo de tiempo de tránsito y de tiempo de espera en la evolución de un servo	179
10.4. cf_arquitectura	181
10.5. Diferentes partes del interfaz	185
10.6. Parte superior del interfaz	186
10.7. Posicionamiento de los servos	187
10.8. Parte del interfaz relacionada con los vectores de estado físicos	187
10.9. El interfaz para el control de las secuencias	188
10.10Botones generales	189
11.1. Prototipo final, Cube-2.0	194
11.2. Programa cube-fisico para el control del gusano físico	195
11.3. Entorno de trabajo virtual, para un gusano transversal	196

Capítulo 1

Introducción

1.1. Encuadre

1.1.1. Robótica, Robots y sus diferentes tipos

Hoy en día la robótica como disciplina ha crecido mucho y existe una gran cantidad de robots, cada uno de un estilo totalmente diferente al otro. Es muy difícil hacer una clasificación general válida para todos ellos. Con la idea de encuadrar el objeto de este proyecto se va a realizar una clasificación, que no es en absoluto rígida y en la que las fronteras no son totalmente nítidas, pero que nos servirá para centrar las ideas.

Como primer criterio de clasificación se va a emplear la reentabilidad o provecho comercial que se le puede sacar al robot, que nos permite hacer la primera división entre **robots industriales** y **robots de investigación**. Los primeros tienen un tremendo impacto en la industria y son por tanto económicamente rentables. Los segundos no generan beneficios, al contrario, hay que invertir mucho dinero, pero generan conocimiento y hacen que la robótica evolucione.

Los típicos **robots industriales** [1] son brazos mecánicos, muy pesados, con cierto número de grados de libertad y que se caracterizan por la versatilidad: ahora pintan, ahora sueldan, ahora colocan piezas, etc. según el manipulador que se les enganche. Se utilizan en las plantas de montaje, haciendo trabajos repetitivos y que pueden ser peligrosos para los hombres. En la figura 1.1 hay una foto de un robot industrial de la marca Asea, con seis grados de libertad, tres para posicionar el manipulador y tres para orientarlo. Para tener una visión global sobre los robots industriales se puede consultar [2], para profundizar más [3] y si se quiere algo introductorio de alto carácter práctico, [4].

Por otro lado, están los **robots de investigación**, que intentan aportar algo nuevo a la robótica: nuevos algoritmos más inteligentes, nuevas formas de movimiento, etc. Dentro de estos robots se puede hacer otra clasificación, agrupándolos en tres grandes familias: **Robots humaniformes**, **robots tipo vehículo** y **robots que imitan animales**¹.

Los **robots humaniformes** no son nuevos. Se lleva hablando de ellos mucho tiempo. De

¹Por el término animal agruparemos a todos aquellos seres vivos que no son humanos: otros mamíferos, insectos, peces, arácnidos, etc.



Figura 1.1: Brazo robot industrial, de la marca ASEA.

hecho, la propia palabra *robot* proviene del checo y quiere decir “esclavo”. La primera vez que se emplezó a hablar de robots fue en una novela de ciencia ficción, escrita por Karel Capek [5] en 1917 en la que se describe a unas criaturas mecánicas, robots, creados por un científico con el fin de realizar todo el trabajo duro y pesado para el hombre. Estas criaturas se revelan al final contra su creador. La novela marcó un hito y dió comienzo a una tendencia anti-robot a la que Isaac Asimov² bautizó con el nombre de “Complejo de Frankenstein”, queriendo indicar el miedo que existe a crear criaturas artificiales que puedan llegar a revelarse contra sus creadores.

Isaac Asimov, el creador del término **robótica** como ciencia de los robots, escribió infinitad de cuentos cortos y novelas sobre el tema de los robots humaniformes, pero desde un punto de vista no destructivo, tratando a los robots como máquinas inteligentes que realizan un trabajo muy útil para el hombre. Para garantizar la seguridad definió sus famosas **tres leyes de la robótica**³, que no puedo por menos que reproducir aquí:

1. Un robot no puede hacer daño a un ser humano, o, por medio de la inacción, permitir que sea lesionado.
2. Un robot debe obedecer las órdenes recibidas por los seres humanos, excepto si estas ór-

²Soy un fi el lector de Isaac Asimov. Creo que ha aportado mucho a la popularización de la robótica y me veo en la obligación de citarlo.

³Publicadas por primera vez en la revista “Asombrosa ciencia ficción” en 1942, y estaban incluidas en la historia “el círculo vicioso”. Este cuento, junto a otros se puede encontrar en [6]



Figura 1.2: Vista lateral del robot Asimo creado por Honda

denes entrasen en conflicto con la Primera Ley.

3. Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no sea incompatible con la Primera y la Segunda Ley.

La idea de tener una máquina tan versátil como un ser humano es muy buena. Si todas las herramientas están hechas para que las manejen humanos, ¿no es una buena idea el crear una máquina que maneje esas herramientas en vez de automatizar las propias herramientas? Por ejemplo, una excavadora podría convertirse en un robot autónomo, o se podría sustituir el conductor por un robot humaniforme, sin tener que cambiar la excavadora. Este razonamiento lo deja intuir muy claramente Isaac Asimov en sus obras sobre robots.

Los robots humaniformes de hoy en día, no tienen todavía utilidad comercial, pero son desarrollados por grandes empresas para mostrar su elevada tecnología y conseguir que los medios hablen sobre ellas. Son un reclamo publicitario. El mejor ejemplo está en el robot Asimo [7], desarrollado por Honda y que se puede ver en las figuras 1.2 y 1.3.

En el M.I.T⁴ se está trabajando en un robot humaniforme, COG, con un comportamiento similar al de un niño de dos años[8]. De momento han desarrollado el tronco superior del robot: torso, brazos y cabeza.

Los **robots tipo vehículo** son una evolución lógica del concepto tan usual de medio de transporte: la mecánica ya existe, ahora convertámosla en un robot. Se caracterizan porque disponen de ruedas u orugas que les permiten moverse por un entorno, igual que lo hace un tanque, un coche o una excavadora. Realmente se pueden definir como “vehículos con inteligencia”. Son

⁴MIT son las siglas de ‘Massachusetts Institute of Technology’



Figura 1.3: Vista frontal de Asimo.

robots más sencillos de construir que los humaniformes, más baratos y la mecánica está mucho más estudiada.

Actualmente hay dos tipos de vehículos robóticos. Por un lado los **modelos de iniciación**, que son muy simples y cualquier estudiante o aficionado se los puede construir. En el ambiente universitario se emplean para que los alumnos asimilen los conceptos y aprendan electrónica, mecánica y programación, además de, por qué no, para que se diviertan. Existen numerosos concursos en los que se puede participar, como Robocup [9], donde los robots juegan un partido de fútbol, luchadores de sumo [10] [11], donde se enfrentan en terribles luchas sin tregua, carreras(microracing), salir de un laberinto y rastreadores son otras categorías en las que se compite, como por ejemplo en el concurso Alcabot en la Universidad de Alcalá de Henares [12].

En la figura 1.4 se muestran escenas de un concurso de luchadores de sumo celebrado en la UPC. Dos robots se sitúan frente a frente en un tatami circular, de color negro, estando el borde delimitado por un color blanco. El objetivo es echar fuera del tatami al adversario. Para ello los robots deben estar dotados de sensores que le permitan detectar si ellos mismos se salen fuera, analizando el color del suelo, y sensores para detectar al adversario. Además de esto deben disponer de mecanismos para expulsar al enemigo.

En la figura 1.5 se muestra en la parte de la izquierda el concurso de “robots limpiadores de superficie” también celebrado en la UPC. En este caso el robot lucha contra el reloj y tiene que recoger de un recinto cerrado tantos granos de arroz como pueda. Si además los deposita en “la basura” obtendrá más puntos. En la foto de la derecha se muestra un robot que concursó en Sumo y en cuya construcción participó el autor de este proyecto. Se trata de un toro que en cuanto detecta al enemigo comienza a embestir hasta que lo expulsa del tatami.

Otro tipo de vehículos más avanzados son los de exploración, que sirven para reconocer un entorno hostil, donde el hombre no puede llegar, y así obtener datos y realizar medidas. La NASA está trabajando en este tipo de robots. La sonda **Mars Pathfinder** [14] que se envió a Marte llevaba en su interior un vehículo autónomo para recorrer el entorno y tomar muestras de

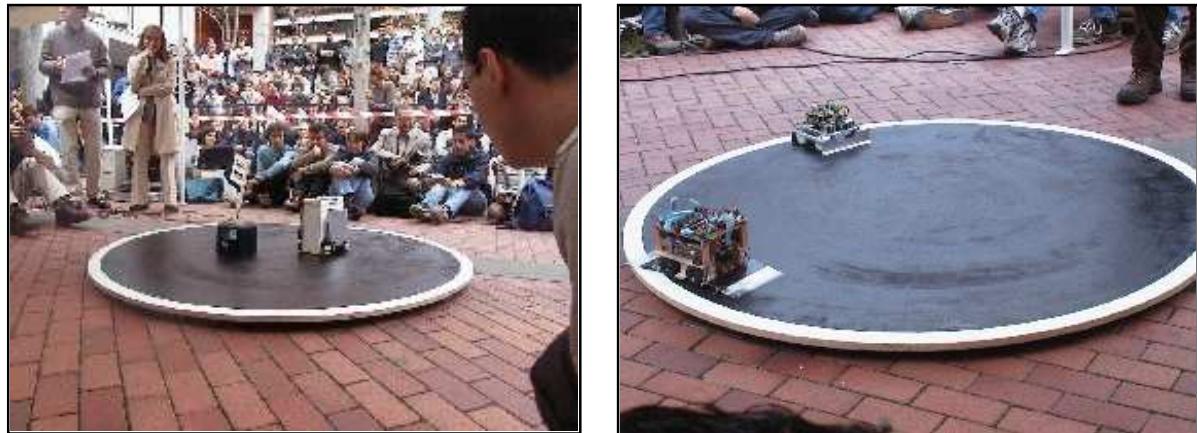


Figura 1.4: Concurso de luchadores de sumo celebrado en la UPC, 2000



Figura 1.5: Izquierda: Concurso de limpiadores de superficie, UPC, 2000. Derecha: Robot de sumo Tauro-viper.



Figura 1.6: Vehículo MICROROVER analizando la roca “yogi” en Marte

la superficie de marte. Aunque gran parte del control de este robot se realizaba remotamente, estaba dotado de una cierta inteligencia que lo diferencia mucho de un simple robot por “radio control”.

La misión a marte fue un éxito, aunque el vehículo se quedó a veces “atascado”, teniendo que hacer muchas maniobras para poder avanzar por el pedregoso terreno. Esto puso de manifiesto dos aspectos importantes: Por un lado la viabilidad de enviar robots en vez de hombres, que es mucho más barato y menos arriesgado. Por otro lado la necesidad de enviar robots cada vez más versátiles y que se adapten a cualquier tipo de superficie.

En la figura 1.6 hay una foto del Microrover sobre la superficie de Marte, tomada desde la sonda. Está analizando la roca “Yogi”. Puede verse la cantidad de piedras que hay sobre el terreno y lo complicado que resultó para el robot poder acceder a la roca. En la figura 1.7 se muestra una versión prototípico del Microrover que se está probando en los laboratorios de la NASA, en un entorno que simula la superficie marciana.

1.1.2. Robots animales

Con la idea de buscar robots que puedan sustituir a los vehículos con ruedas, de manera que puedan moverse por superficies donde éstos no pueden, ingenieros y científicos están imitando animales, que se encuentran muy bien adaptados al medio en el que viven. ¿Para qué inventar una máquina nueva, si la evolución ha creado unas criaturas perfeccionadas por el transcurso de



Figura 1.7: Prototipo del MICROROVER en los laboratorios de la NASA

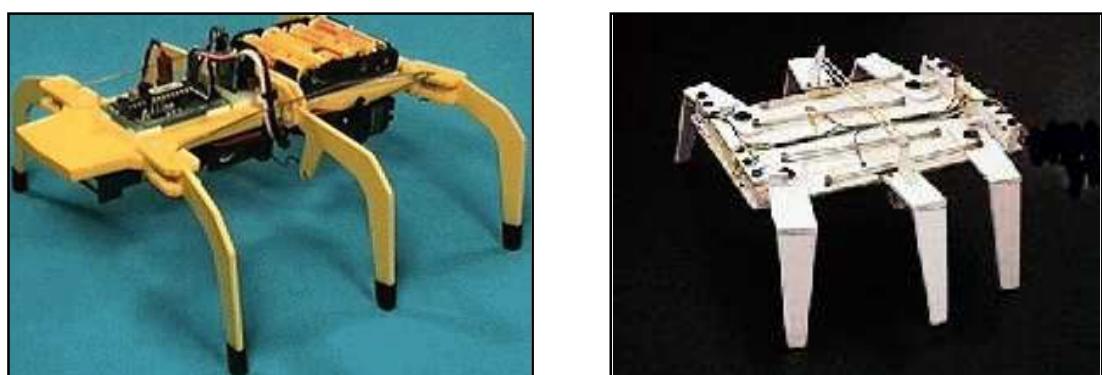


Figura 1.8: Dos robots hexápodos muy simples



Figura 1.9: AIBO, el “Perro” robot de Sony

miles de años y que están exitosamente adaptadas al medio en el que se desenvuelven? Esta idea de imitar a la naturaleza es una fuente de inspiración muy fuerte para los técnicos. El problema es que los animales son tan tremadamente complejos que el hombre sólo puede hacer burdas imitaciones, de momento. Qué más quisieran los ingenieros de la Nasa que crear un vehículo de exploración que fuese un “mono robot” y que pudiese realizar sus mismos movimientos. No existirían obstáculos para la exploración de entornos hostiles fuera de la Tierra.

Una manera de clasificar los animales robots es atendiendo al número de extremidades. Están los robots con patas y los “sin patas”. Los **robots con patas** intentan heredar las características de sus animales replicados. Al tener patas son rápidos, aunque no tanto como los vehículos, ágiles, pueden moverse por terrenos complicados y tienen la capacidad de poderse impulsar para dar pequeños saltos. Esto es en teoría lo que podrían llegar a hacer. En la práctica son lentos y bastante torpes, como si fuesen crías recién nacidas. Conseguir movimiento con patas no es una tarea nada trivial. La coordinación entre las diferentes articulaciones es un problema que todavía no está resuelto de una forma elegante. En la figura 1.8 se muestran dos robots hexápodos, con seis patas. Se puede ver que su estructura es muy simple y dan la impresión de ser lentos y poco ágiles. Distan mucho todavía de moverse como una hormiga real.

Según el número de patas del robot, se pueden denominar cuadrúpedos, hexápodos, octápodos,etc. Los **cuadrúpedos** tienen “personalidad propia” y difieren mucho del resto. Este tipo de robots tienen mucho parecido con las mascotas que los humanos empleamos (gatos, perros,etc.) por lo que son muy “amigables” y tienen mucha aceptación entre el público en general. Quizás sea una forma de ir introduciendo la robótica poco a poco y que la gente venza el “complejo de Frankenstein” al que hace referencia Asimov. La mascota que más sorprende es AIBO [15], desarrollada por SONY, que se puede ver en la figura 1.9. En la foto de la izquierda está andando ante la estupefacta mirada de un perro de verdad. Sorprende lo logrado que está el acabado final y la coordinación tan buena que tiene. En el ambiente universitario también se han desarrollado estos robots, con un presupuesto mucho más bajo, pero los resultados obtenidos son sorprendentes. Es el caso de Puchobot [16], desarrollado por D. Andrés Prieto-Moreno Torres en la UPM,

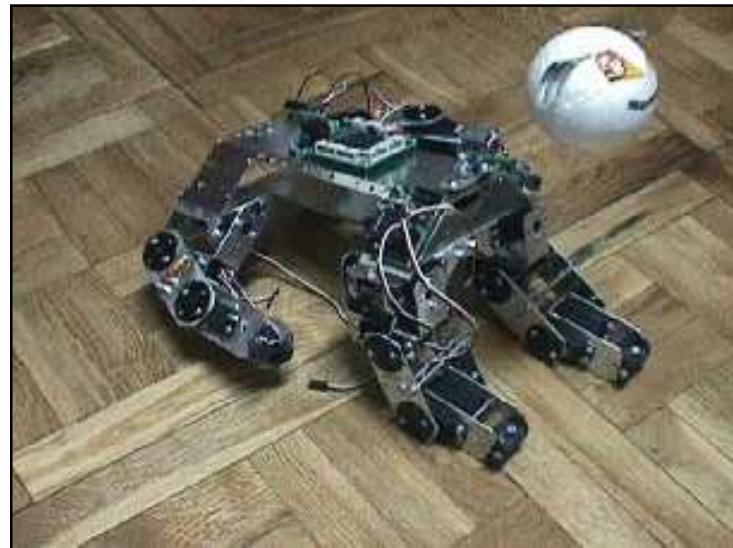


Figura 1.10: PUCHOBOT, un perro robot desarrollado por Andrés Prieto-Moreno Torres

como proyecto fin de carrera, y que se puede ver en la figura 1.10. Está dotado de doce articulaciones controladas por una red maestro-esclavo de microcontroladores. El perro es autónomo (no necesita conectarse al PC para su funcionamiento), puede avanzar, girar, sentarse, dar la pata, etc. Las secuencias de movimiento se programan desde el PC y luego se envían a Puchobot para que las reproduzca. El entorno de desarrollo es excelente y pone de manifiesto lo compleja que es la coordinación de todas las articulaciones para conseguir el movimiento. Se trata de una plataforma ideal para probar diferentes secuencias de coordinación y estudiar con detenimiento el movimiento de los cuadrúpedos.

Los **robots hexápodos** tienen sólo dos patas más que los cuadrúpedos pero son radicalmente opuestos a estos. Para empezar, si la coordinación de cuatro patas es compleja, la de seis lo es muchísimo más. Normalmente los prototipos tienen seis patas pero no son independientes, sino que bien mecanicamente o por software la patas se “aparean” de manera que cuando una avanza la otra retrocede o cuando una se levanta la otra baja, con lo que es como si sólo hubiese tres patas libres. Por tener mayor número de patas son mucho más estables. Esta es una propiedad muy interesante y que los hace especialmente útiles, puesto que si pierden una pata, por ejemplo si se estropea la electrónica o el servo, el robot puede seguir desplazándose, peor que al principio, pero lo puede hacer. Sólo hay que hacer el experimento de quitar una pata a una hormiga y ver qué ocurre.

Los hexápodos intentan imitar diferentes insectos, como cucarachas u hormigas. En la figura 1.11 se muestran dos hexápodos totalmente diferentes. El de la derecha es una hormiga⁵ constituida por doce articulaciones. La secuencia de movimiento que se emplea es tremadamente simple y a pesar de ello el avance es muy bueno y tiene unos andares muy “graciosos”. En la foto de la derecha aparece un robot cucaracha, que en vez de servos usa actuadores neumáticos, de

⁵Sólo es una hormiga por el número de patas y las antenas, pero no por el tamaño ni el peso.

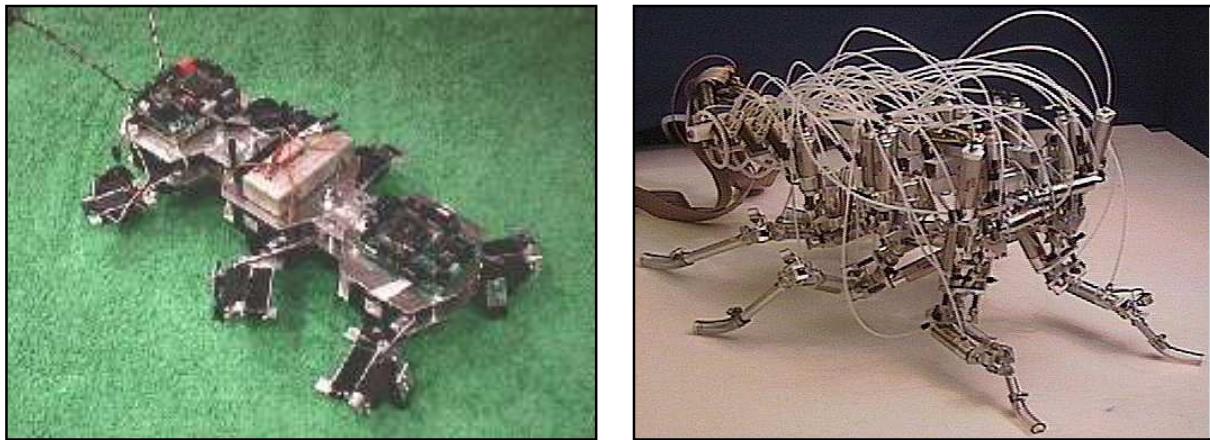


Figura 1.11: Una hormiga y una cucaracha

ahí el elevado número de tubos que interconectan todas las partes. Los robots que imitan insectos o cualquier otra cosa que no sean mascotas tienen menos aceptación entre la gente. Los suelen denominar bajo el término **“bichos”** y como se parecen a los insectos que imitan, generan cierto rechazo⁶.

1.1.3. Robots sin patas

Los robots sin patas son conocidos como **robots gusano** o **robots serpiente** (snake robots). Estos no son tan veloces ni tan ágiles como los que tienen patas, pero tienen una serie de ventajas que justifican su investigación. Al tener una forma alargada, pueden penetrar por sitios a los que otro tipo de robot no tiene acceso, como por ejemplo una tubería. Pueden adoptar la forma de la superficie por la que se desplazan, de manera que pueden hacerlo por sitios muy tortuosos. Están compuestos por segmentos iguales, que se enganchan unos a otros, pudiendo conseguirse robots de cualquier longitud. En la figura 1.12 se muestra uno de estos “bichos”, diseñado por la NASA, en el que se puede apreciar claramente los diferentes segmentos idénticos que la componen. También se puede ver la facilidad que tienen para adoptar cualquier forma.

El desplazamiento se consigue mediante ondas que recorren el robot, para lo cual las articulaciones tienen que estar perfectamente coordinadas. Las ondas pueden ser:

- **Ondas transversales:** El movimiento de la onda es perpendicular a la dirección de avance. Existen dos posibilidades, según como esté situado el plano que contiene a la onda con respecto al plano por el que se desplaza el robot:
 - **Ondas transversales paralelas:** Es el clásico movimiento de las serpientes, haciendo “eses”. También se denomina movimiento de serpentina (serpentine movement). Las ondas se transmiten desde la cabeza hasta la cola generando movimiento.

⁶**Anécdota:** Todavía recuerdo la expresión que empleó mi hermana Virginia cuando por primera vez vió moverse a Cube, el gusano que se construye en este proyecto: “¡Qué asco!”, exclamó. Lógicamente, esto me agrado porque quería decir que el movimiento estaba muy logrado y que realmente se parecía a un gusano.



Figura 1.12: Un robot serpiente diseñado en la Nasa

- **Ondas transversales perpendiculares:** Es el movimiento de los gusanos de seda. Aquí las ondas se transmiten desde la cola hasta la cabeza.
- **Ondas longitudinales:** El movimiento de la onda se realiza en la misma dirección de propagación. Las ondas son como las del sonido al propagarse: contracción-expansión-contracción. Es el movimiento de las lombrices de tierra.

Estos tipos de desplazamientos pueden superponerse entre ellos. Las serpientes por ejemplo no sólo hacen el movimiento de serpentina sino que también realizan contracciones y expansiones. Lo mismo les sucede a los gusanos de seda con las ondas longitudinales y las transversales perpendiculares.

Este proyecto se encuadra en el campo de los robots de investigación, de tipo animal y sin patas. En concreto se centra en el movimiento unidimensional mediante ondas transversales, perpendiculares a la superficie, que recorren el gusano desde la cola a la cabeza.

1.1.4. Estado del arte

Actualmente se está trabajando con robots “sin patas” en muchos centros de investigación y universidades. En la **NASA** [18] han desarrollado un prototipo muy modular, que se puede ver en la figura 1.12, constituido por muchos módulos iguales, que se enganchan unos con otros, con lo que la serpiente puede crecer tanto como sea necesario. Lo están desarrollando para investigar sobre nuevas formas de movimiento para vehículos de exploración espacial. En particular, las serpientes se adaptan muy bien a cualquier tipo de terreno y se pueden romper en trozos más

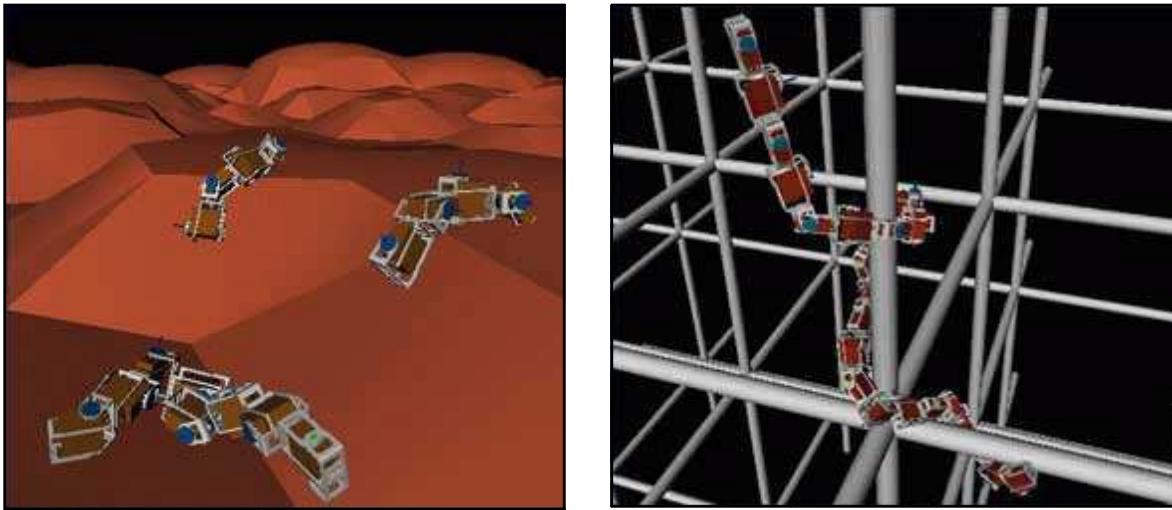


Figura 1.13: Dibujos del robot serpiente de la Nasa. Derecha: se ha fragmentado para explorar un entorno. Izquierda: La serpiente está trepando por una estructura compleja.

pequeños con autonomía propia. En la figura 1.13 se muestran dos dibujos, sacado de la web de la Nasa. En el de la derecha, la serpiente se ha partido en tres trozos iguales y está explorando una superficie de un planeta. En la imagen de la izquierda aparece la serpiente trepando por una estructura compleja, donde otro tipo de robot no podría llegar.

En el Ais (Institute for Autonomous Intelligent systems) dentro del GMD (German National Research) están trabajando con robots serpientes [22] similares a los de la Nasa (fig 1.14), constituidos por diferentes secciones que se conectan para constituir una serpiente completa. Cada sección está controlada por un procesador esclavo y todos los esclavos se interconectan mediante un bus serie (CAN-Bus). Existe un procesador central en la red, el maestro, que coordina el movimiento. La alimentación de la serpiente es externa a ella, teniéndose que conectar un cable. En la figura 1.15 se muestra la serpiente atravesando un obstáculo. Las características para una serpiente de 6 segmentos son:

- Longitud: 200cm
- Peso: 3Kg
- Diametro: 6cm
- Consumo medio: 15Watt
- Velocidad: 50cm/min

Existen también serpientes desarrolladas por particulares. Es el caso del Dr. Gavin Miller, que lleva desarrollando prototipos desde 1992[23]. Sus serpientes se caracterizan por el movimiento de “serpentina”. En la figura 1.16 se muestran los diferentes prototipos que ha realizado y en la

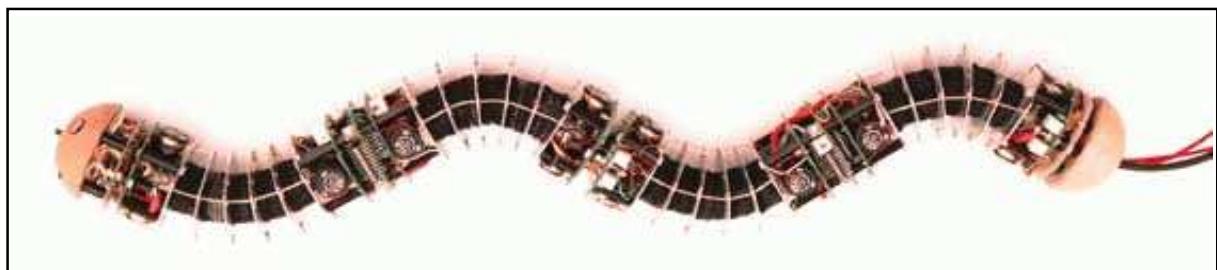


Figura 1.14: Robot serpiente desarrollado en el GMD.



Figura 1.15: La serpiente del GMD atravesando un obstáculo



Figura 1.16: Distintos prototipos de serpiente del Dr. Gavin Miller



Figura 1.17: El Dr. Gavin Miller con su creación.

figura 1.17 se muestra el tamaño real de una de sus serpientes. Para poder desplazarse por las superficies dispone de unas pequeñas ruedas en cada uno de los segmentos.

Muy similares son las serpientes que se han desarrollado en el Mita Laboratory[24], en Japón. En la figura 1.18 se puede ver uno de sus prototipos, constituido por muchas secciones iguales, conectadas. También están trabajando con el movimiento de serpentina.

Para más información puede consultarse [25] donde hay muchísimos enlaces, todos relacionados con este tipo de robots.

1.2. Motivación

Desde pequeño me han fascinado los robots. Quizás fuese por la serie “Mazinger Z”, no lo sé, pero la curiosidad y la necesidad de estudiar y diseñar robots me han acompañado desde que tengo uso de razón.

De hecho, el entrar en la Escuela de Teleco no fue casualidad. En una visita al Simo, que por aquel entonces no era tan grande como lo es ahora, ví con asombro cómo un brazo robot transportaba objetos de un lugar a otro. Después de hablar con el que había programado el robot y descubrir que era Ingeniero de Telecomunicación, tuve muy claro qué era lo que quería estudiar. Y así fue como me decidí entrar en la ETSIT.

En la escuela tuve la suerte de conocer a tres de mis mejores amigos, con los que trabajo ahora: Cristina, Andrés y Juanjo (Peco). El destino quiso que nos conociésemos y que formásemos un grupo, denominado por entonces como Grupo J&J. Juntos construimos placas microcontroladas

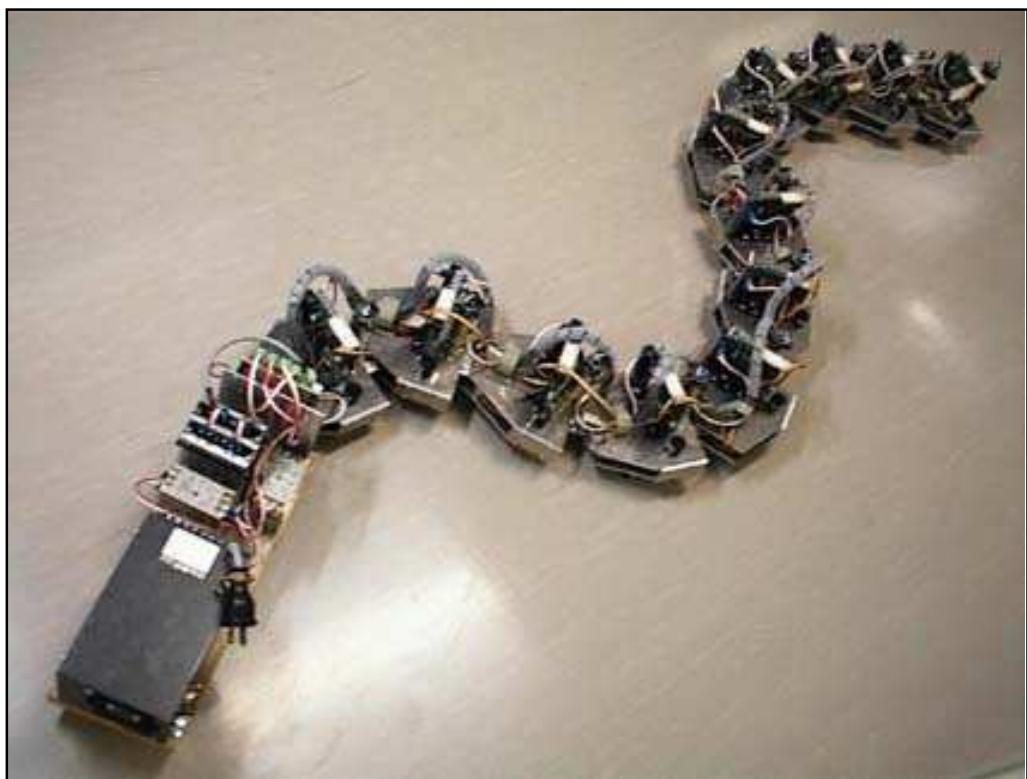


Figura 1.18: Robot serpiente del Mita Lab, en Japón.



Figura 1.19: Tarjetas comercializadas por Microbótica, S.L

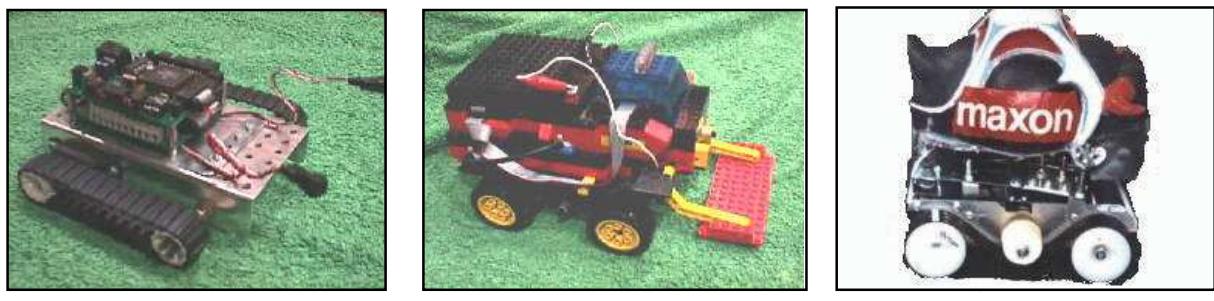


Figura 1.20: Diferentes microbots desarrollados por Microbótica

ladores basadas en el 68HC11 de Motorola (Figura 1.19), así como toda la electrónica necesaria para poder realizar robots básicos. Como miembros de la Rama de estudiantes del IEEE, comenzamos a impartir talleres de Microbótica⁷, primero en la propia escuela y después fuera de ella [26]. Asistimos al I Concurso Nacial de robot luchadores de sumo, celebrado en la UPC en Marzo de 1997 y en nuestro ratos libres desarrollamos nuevas placas, robots más avanzados y escribimos un libro sobre la programación con el 68HC11[21].

Todo esto nos condujo a formar una empresa, llamada Microbótica S.L [19], dedicada a realizar proyectos y a vender Microbots, sobre todo en Universidades. Un robot que se ha convertido en un “clásico” es Tritt, que destaca por su sencillez y facilidad de programación (Figura 1.21)

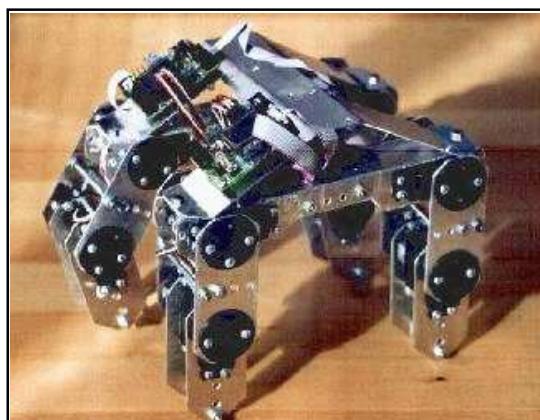
Continuando con las inquietudes en el campo de la robótica, Andrés decidió construir un Perro robot[16] y yo un gusano (Figura 1.22). La pregunta que me abordaba era: ¿Es posible construir un robot sin patas que se pueda mover?. Y la respuesta es este proyecto.

Para comprender mejor el movimiento de los gusanos y poder formalizarlo para su posterior implementación, he visto muchos vídeos de **National Geographic**, en los que aparecen diferentes insectos, entre ellos orugas, larvas, lombrices y gusanos de seda. Toda la parte teórica y los resultados obtenidos se basan en la observación directa del movimiento de estos insectos.

⁷La palabra Microbótica fue inventada por nosotros y nació de la abreviación de las palabras Micro y robótica, con la idea de hacer referencia a un tipo de robot muy diferente del industrial, más simple, sencillo y económico. El término ha tenido tanta aceptación que hasta se han escrito libros sobre el tema [20]



Figura 1.21: El microbot Tritt



PUCHO



CUBE-1.0

Figura 1.22: Los microbots PUCHO y Cube-1.0

1.3. Objetivos

Los **objetivos** de este proyecto son los siguientes:

1. **Diseño y construcción de un robot tipo gusano**, que se desplace horizontalmente y en línea recta de forma análoga a como lo hacen los gusanos, mediante **ondas transversales** que se propagan desde la cola hasta la cabeza.
2. Desarrollo del **cálculo automático de las secuencias de movimiento** necesarias para que se desplace en función de la onda aplicada.
3. Diseño de un **software de alto nivel**, para un ordenador PC, que pueda **generar las secuencias** de movimiento del gusano según cómo sea la forma de la onda que lo recorra, su periodo y su amplitud.
4. Estudio de alternativas para la incorporación de **mecanismos de giro**.

El punto 1 implica la construcción de un robot físico, capaz de situar sus articulaciones en la posición indicada por el software. Los puntos 2 y 4 hacen referencia a la teoría necesaria para lograr la coordinación entre las diferentes articulaciones. Y el punto 3 es la implementación software de los cálculos y algoritmos descritos.

En el robot se buscan las siguientes **características**:

1. **Ser económico**, de manera que cualquier persona se lo pueda construir sin tener que realizar una gran inversión. Hoy por hoy no se encuentra nada asequible en el mercado.
2. **Ser fácil de construir**. Las piezas tienen que ser sencillas y fáciles de encontrar en el mercado.
3. **Ser extensible**. Si se tiene poco dinero se construye un gusano corto, pero gastándose más dinero se puede hacer todo lo largo que se quiera. No puede haber limitaciones hardware, software, ni mecánicas.
4. **Ser sencillo**, en general. Por ejemplo pocos tipos de piezas diferentes, fáciles de montar, interconexiones electrónicas simples y fáciles de conectar, etc.

Para cumplir los puntos 1, 2 y 4 no se han implementado los mecanismos de giro descritos en la parte teórica. El llevarlos a la práctica implica un rediseño de la estructura mecánica, dejando en ese caso de ser sencillo y barato.

Finalmente comentar que el gusano recibe el nombre de CUBE⁸

⁸Este nombre no tiene nada que ver con la forma del gusano, ni tampoco significa nada las iniciales. Se puso a raíz de ver la película "CUBE", que al ser tan extraña, el nombre encajaba perfectamente con el de un robot tan poco usual.

1.4. Organización del tomo

Este tomo está organizado en dos grandes partes:

En la **parte I** se abordan todos los aspectos teóricos, necesarios para el correcto entendimiento de los gusanos y su posterior implementación. El **capítulo 2** es introductorio y muy básico. En él se presentan los conceptos fundamentales de la propagación de ondas. Los **capítulos 3** y **4** abordan sendos tipos de gusanos diferentes, los longitudinales y los transversales. En el **5** se presentan el algoritmo principal para el cálculo de secuencias de movimiento: el **algoritmo de ajuste**, que será ampliamente utilizado en la implementación. Finalmente el capítulo **6** aborda el complejo tema de los mecanismos de giro y se presenta un algoritmo para la coordinación de las articulaciones que permite que el gusano describa cualquier trayectoria sobre un plano.

La **parte II** está dedicada a la implementación de CUBE. En el **capítulo 7** se explica el software en el que se ha implementado un gusano virtual, y que sirve para hacer cálculos y generar las secuencias de movimiento. En el **8** se presenta la estructura mecánica, mostrando las diferentes partes y cómo hay que unirlas para construir el prototipo. La electrónica está descrita en el capítulo **9** y por último en el **10** se explica el software en el PC que interactúa con el hardware y con los servos, permitiendo generar secuencias manuales de movimiento y enviando al gusano secuencias generadas con el modelo virtual. Las conclusiones finales y las mejoras futuras se presentan en el **capítulo 11**.

En todos los capítulos hay una introducción y un resumen final. Leyendo sólo estos apartados uno se puede hacer una idea general del contenido del proyecto, sin necesidad de entrar en demasiados detalles.