

# Libros

**Robin R. Murphy, Introduction to AI Robotics (Paradigmas de la Robótica Inteligente), A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, Massachussets, London, England, 2000.**

Revisión extensa de la parte I

Dado el aumento de publicaciones en cualquier área del conocimiento, el valor individual que tienen las publicaciones que sistematizan el material según criterios claramente definidos proveyendo al lector de orientación en la productividad de los enfoques propuestos por diversos autores y de pronósticos acerca de las direcciones prometedoras en el área del conocimiento. La primera parte del libro reseñado "Paradigmas de Robótica" pertenece a este tipo de publicaciones en la área de Robótica Inteligente. Por eso la revisión presta más atención a los capítulos que contienen tales generalizaciones.

Antes de discutir el libro, me gustaría hacer tres comentarios generales. Primero, conviene subrayar, que la autora explica claramente el rol que juega el Paradigma Reactivo en el área de inteligencia artificial y los límites de su aplicabilidad. Los robots móviles controlados según este paradigma demostraron un comportamiento, similar al comportamiento de los insectos. La aplicación de este paradigma para construir medios autónomos de transporte para la exploración de los planetas fue justificada en primer lugar, por su costo aceptable y la posibilidad de realizar proyectos de investigación dentro de plazos razonables. Estas características son extremadamente importantes, sin embargo, no dan argumentos para hablar sobre los sistemas basados en el Paradigma Reactivo como sobre sistemas con inteligencia artificial en su sentido aceptado. Es importante estar consciente de este hecho para evitar tanto la sobrestimación de las posibilidades de este paradigma como también la subestimación del rol de los trabajos sobre la realización del Paradigma Reactivo, los cuales han ratificado la reactividad del comportamiento como la propiedad intrínseca de los sistemas distribuidos de inteligencia artificial.

Segundo, es necesario tomar en cuenta que la parte de definiciones y generalizaciones de la autora, refleja su punto de vista personal (o el de un grupo) de problemas de la robótica inteligente. Como objetos de investigación del área de

robótica inteligente se investigan sólo robots móviles. Pero los problemas del funcionamiento en tiempo real de robots manipuladores en un ambiente natural (no organizado en manera especial) no son más simples debido a la gran dimensión del espacio de configuraciones en el cual se realiza el control por el manipulador, ausencia de isomorfismo del espacio de configuraciones a espacio físico tridimensional en el cual el robot funciona, y también debido a la necesidad de moverse no sólo en la proximidad inmediata a obstáculos sino de operar en contacto con otros objetos. Además, algunos robots móviles avanzados no corresponden a los paradigmas considerados por la autora.

Tercero, es necesario constatar que la autora no logró evitar la sobrestimación del papel del Paradigma Reactivo. Según su libro el Paradigma Híbrido ha surgido como el desarrollo del Paradigma Reactivo mientras que la tendencia estándar en la Robótica Inteligente es la transición de la arquitectura jerárquica a la de varios niveles con el empleo de subsistemas reactivos en el nivel inferior de la jerarquía. Esta tendencia está representada por Nils J. Nilsson en su libro "Artificial Intelligence. A New Synthesis", Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1998. (Véase también A. Ollero, "Robótica. Manipuladores y robots móviles", Alfaomega-Marcombo, 2001). Sólo por los motivos subjetivos es posible explicar el hecho que fue ignorado por la autora el libro de N. Nilsson. Nilsson, el autor que primero realizó la comprobación de las posibilidades y restricciones de la Inteligencia Artificial construyendo el robot inteligente Shakey y que mostró en su último libro los cambios en la resolución del problema discutido.

En el prefacio del libro la autora dice que su libro puede servir como libro de texto para los estudiantes graduados del primer año de informática e ingeniería del software. El lector debe haber tenido por lo menos un curso en programación orientada a objetos para seguir las discusiones sobre cómo poner en ejecución y programar los robots usando las estructuras descritas en este libro.

A pesar del hecho de que el libro tiene carácter de introducción al área de robótica inteligente, la autora trata de cubrir todos los aspectos necesarios para programar robots de inteligencia artificial para los usos que implican la detección, navegación, el planeamiento de la trayectoria, y la navegación con incertidumbre.

El libro se divide en dos partes: Paradigmas de Robótica (una descripción y 8 capítulos) y Navegación (una descripción y 4 capítulos). La atención básica de la parte I se ocupa de los Paradigmas de Robótica, especialmente de un Paradigma Reactivo, (el resto de los siete capítulos se refiere a este paradigma). También son examinados los problemas relacionados con la detección y visión de computadora, la coordinación y el control de equipos de multi-agentes. La parte II dedica tres capítulos a las técnicas cualitativas y métricas del planeamiento de la navegación y de la trayectoria, el control en condiciones de incertidumbre. El libro concluye con un intento de la autora para identificar las nuevas tendencias en robótica inteligente .

En la descripción de Paradigmas de Robótica un robot inteligente se define como una criatura mecánica que puede funcionar autónomamente. Un paradigma se define como una filosofía o conjunto de suposiciones y/o técnicas que caracterizan un acercamiento a una clase de problemas.

La autora analiza tres paradigmas para organizar la inteligencia en robots: jerárquico, reactivo, e híbrido deliberativo / reactivo. Los paradigmas son detallados de dos modos: por la relación entre las tres primitivas de robótica comúnmente aceptadas: SENTIDO, PLAN, ACTO, y por el camino del cual datos sensoriales son procesados y distribuidos por el sistema.

El Paradigma Jerárquico es el paradigma más viejo, y era frecuentemente usado en el período de 1967 - 1990. Según este, el robot funciona de una manera de arriba - abajo: el robot detecta el mundo, planea la siguiente acción, y después actúa (SENTIDO-PLAN-ACTO). En cada paso, el robot planea explícitamente el movimiento siguiente. La otra característica del Paradigma Jerárquico es que todos los datos de detección tienden a ser recolectados en un modelo global del mundo, una sola representación que el planificador pueda utilizar. Construir modelos globales genéricos del mundo resulta algo muy difícil debido al problema del marco (frame problem) y a la necesidad de una suposición de un mundo cerrado.

Mientras que el Paradigma Jerárquico asume que la entrada de información a un ACTO será siempre el resultado de un PLAN, el Paradigma Reactivo asume que la entrada a un ACTO será siempre la salida directa de un sensor, SENTIDO. Es el tipo de organización de SENTIDO-ACTO. El robot tiene casos múltiples de los acopladores de SENTIDO-ACTO.

Estos acopladores son procesos concurrentes, llamados comportamientos, que toman datos de detección local y escogen la mejor acción independientemente de lo que están haciendo los otros procesos. Por eso un robot que funciona según el Paradigma Reactivo no se limita a hacer sólo una cosa. El Paradigma Reactivo fue una reacción al Paradigma Jerárquico; tenía como meta alcanzar avances en robótica. Fue muy usado en robótica en el período de 1988 -1992. Todavía se utiliza, pero desde 1992 ha habido una tendencia hacia arquitecturas híbridas. El Paradigma Reactivo sigue a las dos tendencias. Primero, entre los investigadores de inteligencia artificial era popular usar los resultados de investigaciones en biología y psicología cognoscitiva para examinar ejemplares vivos de inteligencia. Segundo, el costo del hardware (aparejado con el aumento en productividad de computación) rápidamente disminuía. Y aunque el Paradigma Reactivo en estado puro no ha proporcionado la decisión de los problemas accesibles a la inteligencia humana, tiene muchas propiedades deseables, sobre todo la reacción rápida (en base a excepción de cualquier planificación). Consecuentemente, el Paradigma Reactivo sirve como base para el Paradigma Híbrido Deliberativo/Reactivo.

El Paradigma Híbrido surgió en los años 90 y continúa siendo un campo de investigación actual. Bajo el Paradigma Híbrido, el robot primero planea cómo es mejor descomponer una tarea en subtareas (también llamados "planeamiento de la misión") y entonces cuáles son los comportamientos convenientes para lograr cada subtask, etc. Los comportamientos comienzan a ejecutarse según el Paradigma Reactivo. Este tipo de organización es PLAN, SENTIDO-ACTO, donde la coma indica que el planeamiento está hecho en un paso, entonces detectando y actuando están hechos simultáneamente. La detección de la organización en el Paradigma Híbrido es también una mezcla de los estilos Jerárquico y Reactivo. Los datos del sensor son accesibles a cada comportamiento que necesite ese sensor, pero están también disponibles para el planificador para la construcción de un modelo global orientado a la función del mundo. El planificador puede también "escuchar detrás de las puertas" los datos de los sensores usados por cada comportamiento (es decir, el comportamiento identifica los obstáculos que entonces podrían ser puestos por un planificador en un mapa del mundo). Cada función realiza cómputos en su propia velocidad (el planeamiento deliberativo, que es generalmente de cómputo costoso, se puede planear cada 5 segundos, mientras que los comportamientos

reactivos se ejecutan a menudo en 1/60 segundos).

La determinación de que un paradigma particular corresponde a un uso, es ciertamente el primer paso para construir el componente de un robot. Para visualizar cómo aplicar estos paradigmas a los usos del mundo real, es provechoso examinar arquitecturas representativas. Estas arquitecturas proporcionan los estereotipos para una puesta en la práctica, así como ejemplos de lo que significa cada paradigma realmente. El libro se centra en los componentes comunes para programar un robot y también en los principios y las reglas de conectar estos componentes. Para evaluar durante el desarrollo de un robot nuevo, si una arquitectura previamente desarrollada se adecua al uso actual, se usa un sistema de cuatro criterios tales como modularidad, compatibilidad con la meta, transportabilidad (la posibilidad de otros usos u otros robots), robustez (cómo reducir la vulnerabilidad del sistema).

El capítulo 1 "De Teleoperación a Autonomía", define la noción de robot inteligente como una criatura mecánica que puede funcionar autónomamente. Describe las diferencias entre los enfoques de la Inteligencia Artificial y de la Ingeniería Robótica, la diferencia entre telepresencia y control semiautónomo, da una breve historia de robótica, hace una breve descripción de las siete áreas principales de la Inteligencia Artificial (representación del conocimiento, entendimiento del lenguaje natural, aprendizaje, planificación y solución de problema, inferencia, búsqueda y visión) y de cómo ellos podrían ser usados en la Robótica.

El capítulo 2 "Paradigma Jerárquico" describe el Paradigma Jerárquico, dos arquitecturas representativas y valora estas arquitecturas de acuerdo con los cuatro criterios de evaluación mencionados. Los componentes principales de los sistemas basados en el Paradigma Jerárquico están escritos usando como ejemplo el robot Shakey. La autora presenta la evolución de las arquitecturas jerárquicas y explica el porqué, incluso con un mayor poder de cálculo alcanzado, el acercamiento jerárquico basado en lógica es insatisfactorio para las tareas de navegación que requieren un tiempo de respuesta rápido a un mundo abierto.

El capítulo 3 da la plataforma para entender el Paradigma Reactivo examinando los conceptos dominantes de la biología, de la etología (el estudio del comportamiento animal) y de la psicología cognoscitiva (el estudio de cómo

la gente piensa y representa el conocimiento) que sirvieron para motivar el cambio de los sistemas Jerárquicos a los sistemas Reactivos. El componente básico fundamental de la inteligencia natural es un comportamiento que muestra cómo las entradas sensoriales forman un patrón de acciones motoras que entonces son usadas para alcanzar una tarea. Los comportamientos se dividen en tres amplias categorías: los comportamientos reflexivos son del tipo "estímulo-respuesta" (el estímulo está directamente conectado a la respuesta para producir el tiempo de respuesta más rápido); los comportamientos reactivos son aprendidos y luego consolidados para ser ejecutados inconscientemente; los comportamientos conscientes son del tipo deliberativo. Un comportamiento reactivo en la Robótica refleja un comportamiento reflexivo en etología. La autora analiza la coordinación y control de los comportamientos, muestra programas de simulación de los mecanismos de gatillo innatos, escribe los comportamientos concurrentes.

La atención seria se fija en el papel de la percepción de los animales en el comportamiento. La misma percepción tiene aquí dos papeles: como el gatillo para el comportamiento o percepción que dirige el comportamiento (tanto un gatillo como una guía). Existen también dos caminos para el procesamiento de percepción: percepción directa (affordances) y reconocimiento. En el camino de percepción directa se usan las potencialidades perceptibles del ambiente para iniciar una acción. Los afrontamientos son en particular atractivos a la robótica porque ellos pueden ser extraídos sin la inferencia, la memoria o representaciones intermedias. El camino de reconocimiento hace empleo de la memoria y las representaciones globales para identificar y marcar cosas específicas en el mundo.

En la teoría del esquema el comportamiento se interpreta como esquema, que está compuesto de esquema motor y esquema de percepción. En psicología aplicada la teoría del esquema se usa desde principios de los años 90. Los esquemas fueron concebidos como un modo para expresar la unidad básica de actividad. La teoría del esquema de M. Arbib proporciona un modo provechoso de transformar algunas ideas en un formato de programación orientada a objetos. Un esquema consiste en: el conocimiento de cómo interpretar y/o percibir (el conocimiento, estructuras de datos, modelos) así como en el proceso computacional usado para lograr la actividad (el algoritmo).

En la conclusión del capítulo la autora formula los principios y problemas en la transferencia del concepto de comportamiento de animales a robots.

El capítulo 4 describe el Paradigma Reactivo y las arquitecturas que originalmente popularizaron este acercamiento. También ofrece definiciones de los comportamientos primitivos del robot. A diferencia del Paradigma Jerárquico que corresponde a la descomposición de componentes consecutivos (horizontal), el Paradigma Reactivo corresponde a la descomposición paralela (vertical). Bajo una descomposición vertical, un agente comienza con comportamientos primitivos de supervivencia y desarrolla las nuevas capas de comportamientos, los cuales o reutilizan los más bajos, más viejos comportamientos, o crean caminos paralelos para los comportamientos más avanzados. Cada capa tiene acceso a sensores y actuadores independientemente de cualquier otra capa. Si algo pasa en un comportamiento del nivel más alto, los comportamientos de niveles inferiores todavía funcionan.

La percepción sensorial en el Paradigma Reactivo es local para cada comportamiento o más de un comportamiento, puede tomar la misma salida de un sensor y tratarlo de manera diferente. Aquí no se usa representación global del medio ambiente, la reacción en los estímulos es muy rápida. Las características distintivas de casi todas las arquitecturas que siguen el Paradigma Reactivo son:

1. Los robots son agentes colocados y funcionando dentro de un nicho ecológico. El término "agentes colocados" indica que los robots serán considerados parte integral del mundo real.
2. Los comportamientos sirven como componentes básicos para acciones robóticas, y el comportamiento total del robot es emergente.
3. Está permitido usar sólo los datos sensoriales locales específicos para el comportamiento.
4. Estos sistemas intrínsecamente siguen principios del diseño de software: debido a la descomposición de una tarea en componentes de comportamientos. Los comportamientos son probados por separado y pueden ser combinados partiendo de comportamientos primitivos.
5. Los modelos del comportamiento de animales a menudo son citados para estos sistemas o para un comportamiento particular.

Estas características provocaron declaraciones de algunos investigadores de que el Paradigma Reactivo resolvía el problema de representación global del medio ambiente. Pero muy pronto se cayó en cuenta que el Paradigma Reactivo no proporciona la solución de todos los problemas de la robótica inteligente: a menudo la parte del esquema de percepción de comportamiento tiene que usar una representación del comportamiento específico o la estructura de datos para sustituir a detectores especializados capaces de extraer afrontamientos.

Una arquitectura reactiva debe proporcionar mecanismos para provocar comportamientos y para determinar qué pasa cuando múltiples comportamientos son activados al mismo tiempo. Las dos arquitecturas reactivas mejor conocidas y más formalizadas son la subsuposición y metodologías del campo potencial. Un tercer estilo de arquitectura reactiva es la codificación de reglas, donde el componente de esquema motor de comportamientos y el mecanismo de combinación son representados como reglas lógicas.

Los robots móviles relacionados con la arquitectura de subsuposición eran los primeros robots capaces de andar en tiempo real evitando colisiones y pasando encima de obstáculos. Un comportamiento se representa como red de módulos de "sentimiento" y actuación que logran una tarea. Los módulos son las máquinas de estados finitas que tienen registros, temporizadores, y otras ampliaciones de los vínculos para permitirles hacer interfases con otros módulos. Los comportamientos se inician en un modo de estímulo/respuesta, sin un programa externo que los coordine y controle.

Los cuatro aspectos interesantes de subsuposición en términos de iniciación de comportamiento y de control son:

1. Los módulos están agrupados en capas de competencia.
2. Los módulos en una capa más alta pueden anular, o subsumir (modificar), la salida de comportamientos en la siguiente capa inferior.
3. El empleo de estado interno (cualquier tipo de representación local, persistente que representa el estado del mundo, o un modelo) es evitado. Como el robot es un agente situado, la mayor parte de su información debería venir directamente del mundo.
4. Una tarea es llevada a cabo por la activación de la capa

apropiada, que después activa las capas inferiores debajo de ella, etcétera. (Sin embargo, prácticamente los sistemas del estilo de subsuposición no son fácilmente usados porque para ordenarles hacer otra tarea, es necesaria su reprogramación).

El diseño de capas y comportamientos de componentes para iniciar la subsuposición, como con todo diseño de comportamientos, es difícil. Esto es más un arte que una ciencia, lo que es también verdadero para todas las arquitecturas reactivas.

Metodologías de campo potencial, requieren que los comportamientos sean expresados como campos potenciales y los comportamientos sean combinados por la adición de campos. Los campos potenciales se representan como un conjunto, o campo de vectores. El vector en cada elemento del espacio representa la fuerza que actúa sobre el robot. El campo representa lo que el robot debería hacer (el esquema motor) en el caso de que encontrase los obstáculos (el esquema de percepción). Para construir campos complejos se usan combinaciones de campos potenciales básicos, o primitivos: uniforme, perpendicular, atractivo (con respecto a la meta), repulsivo (con respecto al obstáculo) y tangencial. Los comportamientos son definidos como uno o varios esquemas tanto motores como de percepción y/o comportamientos. Todos los comportamientos funcionan simultáneamente y los vectores de salida son sumados. La percepción por lo general es manejada por la percepción directa o afrontamientos. La percepción puede ser compartida por múltiples comportamientos. Un conocimiento a priori puede ser suministrado a los esquemas de percepción para emular un sensor especializado que pueda ser más receptivo a algunos acontecimientos. La autora analiza detalladamente las ventajas y carencias de las metodologías de campo potencial.

La principal conclusión de su evaluación de Arquitecturas Reactivas es que a pesar de las diferencias, la subsuposición y campos potenciales parecen ser en gran parte prácticamente equivalentes. Proporcionan el apoyo tanto a la modularidad como a la orientación hacia la meta. La facilidad de transportabilidad a otros dominios está en relación con la complejidad de los cambios de la tarea y el ambiente. Ningún estilo de arquitectura explícitamente dirige la robustez, aunque en teoría, si sólo una capa más alta de un sistema de subsuposición fracasa, las capas inferiores

aseguran la supervivencia del robot.

El capítulo 5 intenta ayudar al diseñador novato en la construcción de un sistema de robot reactivo. Para esto son presentados un enfoque de programación orientado a objetos para diseñar comportamientos y dos técnicas: autómatas finitos y escrituras - para controlar las secuencias de comportamientos.

Para transferir los conceptos teóricos a la programación orientada a objetos se usa la teoría del esquema. Un esquema como objeto de programación se interpreta como una clase. La clase tiene un método opcional llamado un programa de control coordinado. El programa de control coordinado es una función que coordina cualquier método o esquema en una clase. Se usan tres tipos de esquemas: Esquema de Comportamiento, Esquema de Motor y Esquema de Percepción. El Esquema de Comportamiento se compone de al menos un Esquema de Percepción y un Esquema de Motor; estos esquemas actúan como métodos para la clase de Comportamiento. Los autómatas finitos ofrecen una representación formal de la lógica de coordinación que tienen que controlar una secuencia de comportamientos.

La autora explica en detalle los pasos en diseño de inteligencia de robot bajo el Paradigma Reactivo los cuales son: describa la tarea; describa el robot; describa el ambiente; describa cómo el robot debería actuar en respuesta a su ambiente; refine cada comportamiento; prueba cada comportamiento por separado; prueba con otros comportamientos.

El capítulo 6 describe las técnicas de percepción más comunes para robots reactivos. A diferencia de otros capítulos que tratan con paradigmas y arquitecturas, este capítulo centra la atención en problemas técnicos.

En un robot reactivo la percepción de algunos atributos del mundo por sensores es usada por el esquema de motor, que conduce a una acción. Los comportamientos son más a menudo del tipo de estímulo-respuesta, que confía en la percepción directa en vez de usar la memoria. El reconocimiento no es compatible con la reactividad, aunque esto ahora ya no es verdad, en parte debido al aumento de poder computacional de chips de objetivo general.

De acuerdo a los principios de su funcionamiento se distinguen los sensores pasivos y activos. Los sensores pasivos confían en el ambiente para proporcionar el medio para la observación (por ejemplo, una cámara requiere una cierta

cantidad de luz ambiental para producir una imagen utilizable). Los sensores activos emiten la energía en el ambiente para cambiar la energía o realzarla. Una modalidad de sensor se refiere a lo que la entrada lleva al sensor como: sonido, presión, temperatura, luz, etcétera.

De acuerdo con el tipo de información extraída por los sensores, pertenecen a sistemas de propiocepción (las medidas de movimientos en relación con un sistema de coordenadas del robot), exerocepción (las medidas de disposición del medio ambiente y objetos en relación con un sistema de coordenadas del robot) o expropriocepción (las medidas de la posición del cuerpo del robot o de sus partes en relación con la disposición del ambiente). Casi todos los robots móviles tienen alguna forma de propiocepción (muchos motores vienen con un codificador de eje que mide el número de vueltas que el motor ha hecho lo que permite estimar la distancia viajada). La navegación reactiva requiere exerocepción, por medio del cual el robot observa el ambiente. Propriocepción y expropriocepción pueden dirigir un robot sobre un camino, pero exerocepción puede prevenir que golpee un obstáculo inesperado o el caer de una roca. El sensor exeroceptivo más común para robots reactivos es un transductor ultrasónico o infrarojo. La visión de computadora se hace cada vez más común tanto para la exerocepción como para la expropriocepción. La tecnología GPS en la aplicación de los robots reactivos en la agricultura y transporte autónomo se ha hecho popular.

En el caso de más de un sensor se realiza la fusión de sensores. Están definidos tres tipos de fusión de sensores: la fisión de sensores (las acciones de salidas de pares "sensor-comportamiento" se combinan y definen la acción resultante), la fusión de sensores orientada por acción (las percepciones se combinan y la percepción resultante define el comportamiento correspondiente que inicia una acción) y la selección de modo de sensores (cambio de sensores cuando se cambian circunstancias). En el capítulo se consideran atributos principales de sensores, se nombran diferentes tipos de sensores y brevemente se explican los principios de su trabajo.

El capítulo 7 describe el paradigma Híbrido Deliberativo-Reactivo concentrándose en las tendencias de arquitectura. Hasta este punto, se da el énfasis en la programación de un solo robot.

Existieron muchos algoritmos que podrían, de acuerdo con el Paradigma Jerárquico calcular un camino óptimo para un robot. Pero si el robot trata de ejecutar un camino precalculado, sería vulnerable a cambios inesperados del mundo y el camino precalculado puede no realizarse. Pero si el robot usa comportamientos reactivos para navegar, no habría ninguna garantía de que pudiera alcanzar su objetivo más rápido. La solución común era la de mezclar la planificación del camino y la reacción teniendo un algoritmo de planificación en el que el cartógrafo genera una ruta completa óptima para el robot, pero luego descomponía aquella ruta en segmentos. Un objetivo intermedio de alcanzar (que corresponde al segmento siguiente) evitando los obstáculos puede ser logrado por comportamientos del Paradigma Reactivo.

De acuerdo con la organización de un sistema Híbrido Deliberativo/Reactivo primero el robot planea como lograr una misión (usando un modelo global del mundo) o una tarea (PLAN), entonces inicia un conjunto de comportamientos (SENTIDO-ACTO) para ejecutar el plan (o una parte del plan). Los comportamientos se ejecutan hasta que el plan sea completado, entonces el planificador genera un nuevo conjunto de comportamientos, etcétera. El PLAN incluye toda la deliberación y el modelo del mundo global no solamente la planificación del camino o la tarea.

La organización de las primitivas SENTIDO, PLAN, ACTO en el Paradigma Híbrido conceptualmente está dividida en una parte reactiva (o el reactor) y una parte deliberativa (o deliberator). El Paradigma Híbrido es una extensión del Paradigma Reactivo, pero los comportamientos en el Paradigma Híbrido tienen una connotación ligeramente diferente que en el Paradigma Reactivo. En el Paradigma Reactivo, "el comportamiento" connota comportamientos puramente reflexivos. En el Paradigma Híbrido, el término "el comportamiento" es por lo general más compatible con este término de etología e incluye comportamientos reflexivos, innatos, y de aprendizaje. También, puestas en la práctica los paradigmas híbridos tienden a usar ensamblajes de comportamientos ordenados con el tiempo, más bien que comportamientos primitivos. Como las puestas en práctica Híbridas están interesadas en comportamientos inesperados más complejos, hay más diversidad en los métodos para combinar la salida de comportamientos concurrentes.

El número de arquitecturas híbridas aumenta rápida-

mente. La autora introduce alguna organización conceptual sobre éstas de dos modos. Primero, ofrece un conjunto de componentes comunes. Segundo, las divide en tres amplias categorías: categoría de gerente, jerarquías de estados, y orientada a modelos.

Los componentes comunes de las arquitecturas híbridas son:

- un Planificador de misión que actúa recíprocamente con el humano, transforma los órdenes en términos de robot, y construye un plan de misión;
- un Secuenciador que genera el conjunto de comportamientos para usar en un orden para lograr una subtarea, y también determina las secuencias y condiciones de activación (recuerde que el ensamblaje de comportamiento reactivo es construido a mano);
- un Cartógrafo que es responsable de crear, memorizar y mantener el mapa o la información espacial;
- un Gerente de recurso que asigna recursos a comportamientos, incluyendo la selección de las bibliotecas de esquemas;
- un agente de Supervisión de Funcionamiento y de Solución de Problema que permite al robot notar si él hace algún progreso o no.

Las categorías (los estilos) de arquitecturas híbridas son:

Los estilos de gerente que enfocan la subdivisión de la parte deliberativa en capas basadas en el alcance del control (la responsabilidad de gerente) de cada función deliberativa. Un módulo de Planificación de Misión sería capaz de dirigir otro, subordinar módulos deliberativos como la navegación, porque la Planificación de Misión (a dónde ir) es más abstracto que la Planificación del Camino (cómo ponerse allí).

Los estilos de jerarquías de estados usan el conocimiento del estado del robot para distinguir entre actividades reactivas y deliberativas. Los comportamientos reactivos no tienen ningún estado, ninguna conciencia de sí mismo, y funcionan sólo en el presente. Las funciones deliberativas pueden ser divididas en aquellas que requieren el conocimiento sobre el estado Pasado del robot (donde está en una secuencia de órdenes) y sobre el Futuro (la misión y la planificación del camino).

Los estilos orientados por modelo están caracterizados por los comportamientos que tienen el acceso a las partes de un modelo del mundo, a menudo al punto que ellos parecen haber regresado al modelo global del mundo Jerárquico

monolítico.

Claro que la arquitectura Híbrida es más compleja que la Reactiva. Pero la opinión actual corriente de la comunidad de robótica, es que la mejor solución general arquitectónica es la arquitectura Híbrida. Primero, el empleo de técnicas de tratamiento asíncronas (la ejecución de tareas múltiples, hilos, etc.) permite funciones deliberativas que se ejecutan independientemente de comportamientos reactivos. Un planificador puede calcular en una manera lenta el siguiente objetivo de un robot para navegar, mientras el robot navega reactivamente hacia su objetivo actual con la posibilidad de modernización rápida. Segundo, la buena modularidad de software permite a subsistemas u objetos en arquitecturas Híbridas ser mezclados y emparejados para usos específicos. Los usos que favorecen comportamientos puramente reactivos pueden poner en práctica solamente el subconjunto de la arquitectura-para-comportamientos, mientras los dominios más cognoscitivos pueden usar la arquitectura entera.

Evaluar las Arquitecturas Híbridas en su totalidad es posible en la base a los cuatro criterios mencionados. En términos de apoyo a la modularidad, cada arquitectura es sumamente modular. Además están divididos en capas, que están a su vez subdivididos en módulos. Como la popularidad del software basado en agentes se incrementa en la Inteligencia Artificial, probablemente más arquitecturas podrán aplicar en la práctica, módulos deliberativos como especialistas independientes. El empleo de especialistas también hace factible la transportabilidad. Los híbridos tienden a tener un alto grado de correspondencia a la meta. La adición del componente deliberativo permite a los Híbridos ser usados para usos no apropiados para sistemas puramente Reactivos. Sin embargo, la división entre la reacción y la deliberación permite a la parte reactiva ser usada sólo para usos puramente reactivos. Las arquitecturas Híbridas a menudo explícitamente intentan asegurar la robustez: módulos dentro de varios componentes deliberativos intentan supervisar el funcionamiento de los comportamientos reactivos y sustituir o adaptar la configuración como sea necesario.

La autora también compara dos paradigmas - Jerárquico e Híbrido - y acentúa que además de la velocidad de ejecución existen otras diferencias principales entre ellos. Los Híbridos explícitamente reflejan más los principios de la ingeniería de software (la modularidad, la coherencia, el diseño para la reutilización, etc.) . Los dos paradigmas también seguramente reflejan actitudes diferentes hacia el

modelo de medio ambiente. En el Paradigma Híbrido, los modelos globales son usados sólo para funciones simbólicas. El problema de marco (frame) no existe o es menor porque 1) la ejecución es reactiva y por lo tanto se adapta mejor a ambientes no estructurados, y 2) los agentes de software pueden usar abstracciones específicas para explotar la estructura de un ambiente para realizar su papel particular en la deliberación. Los modelos globales generalmente son modelos del mundo cerrado, pero el mundo está "cerrado" en el nivel deliberativo. El robot puede pensar en términos de un mundo cerrado, mientras actúa en un mundo abierto. Otra diferencia filosófica principal es acerca del papel de la planificación y ejecución. El sistema Shakey (Paradigma Jerárquico) planea cada movimiento, hasta al nivel más bajo de granularidad, sin embargo, tenía problemas para confirmar que una acción había sido lograda. Cabe señalar que los planificadores modernos a menudo producen proyectos parciales, luego ejecutan aquella parte del plan, observan los resultados y planean el siguiente paso. No es claro si el paradigma de SENTIDO, PLAN, ACTO con el planificador más favorable sea capaz de producir una arquitectura de robot más por intuición atractiva. La distinción final entre los Paradigmas Jerárquicos e Híbridos puede ser la influencia de la biología. El Paradigma Híbrido tiene sus raíces en la etología y proporciona una estructura (framework) para explorar la ciencia cognoscitiva. Es menos claro que el Paradigma Jerárquico sea cognoscitivamente verosímil, aunque ambos compartan la misma motivación cognoscitiva.

El capítulo 8 "Agentes múltiples" ("Multiagentes") explora los métodos de la Inteligencia Artificial para coordinar y controlar las colecciones de robots móviles que trabajan en la realización de una tarea. Las colecciones de dos o más robots móviles que trabajan juntos a menudo son mencionadas como equipos o sociedades de múltiples robots móviles, o más concisamente multiagentes.

Los equipos de multiagentes son deseables por muchas razones. En el caso de exploradores planetarios o quitando rocas de minas, más robots deberían de ser capaces de cubrir un área más amplia. Muchos robots baratos que trabajan juntos podrían sustituir un robot caro, haciendo a multiagentes más rentables. Otra razón para usar múltiples robots es la redundancia: si un robot falla o es destruido, otros robots pueden seguir y completar el trabajo.

Existen semejanzas entre los equipos de robots móviles

y equipos de agentes de software ("webots" que buscan en el web y "knowbots" que hace la obtención de datos), las cuales no son accidentales; el software y la caída física de agentes en un área de investigación en la Inteligencia Artificial, a menudo mencionan la Inteligencia Artificial Distribuida (IAD).

La creación de IAD es muy problemática. La parte de los problemas con los equipos de multiagentes son:

- reconocer las características de un problema que lo hacen conveniente para aplicación de multiagentes;
- separar la tarea entre los agentes y evitar interferencia de uno con el otro que pudiera disminuir la productividad total;
- definir que tipo de comunicación es necesaria entre los agentes;
- predecir y verificar el comportamiento social que pueda surgir.

Las arquitecturas completas para diseñar los equipos de robots están todavía en desarrollo. Los miembros individuales de equipos de multiagentes por lo general están programados con comportamientos, que corresponden a los paradigmas Reactivo o Híbrido Deliberativo/Reactivo. Bajo el Paradigma Reactivo, comportamientos múltiples que actuando simultáneamente en un robot condujeron a un comportamiento inesperado. De la misma manera en el caso de agentes múltiples, las acciones simultáneas pero independientes de cada robot conducen a un comportamiento social inesperado. El comportamiento de grupo puede ser diferente del comportamiento individual, emulando "la dinámica de grupo" o posiblemente "la psicología de masas".

El campo entero de multiagentes es tan nuevo que no hay ningún acuerdo general sobre lo que son las dimensiones importantes, o características, en la descripción de un equipo de multiagentes. Como dimensiones de múltiples agentes se usan heterogeneidad, control, cooperación, y los objetivos.

La heterogeneidad se refiere al grado de semejanza entre los robots individuales de un equipo. Los equipos de robots se dividen en heterogéneos u homogéneos. Los equipos heterogéneos tienen al menos dos miembros con capacidades diferentes en hardware o software, mientras que en los equipos homogéneos los miembros son todos idénticos. Para hacer el asunto más confuso, los miembros

pueden ser homogéneos para una parte de una tarea con los comportamientos idénticos, luego hacerse heterogéneos si los miembros de equipo cambian la mezcla de comportamientos o tareas.

La mayor parte de los equipos de multiagentes son enjambres homogéneos. Cada robot es idéntico, esto simplifica tanto el costo de fabricación como el programa. El modelo biológico para estos equipos es, a menudo, el de las hormigas u otros insectos, que tienen cantidades grandes de miembros idénticos. Como tal, los enjambres favorecen un enfoque puramente reactivo, donde cada robot funciona bajo el Paradigma Reactivo.

Una nueva tendencia en equipos de multiagentes es los equipos heterogéneos. Un robot sirve como líder de equipo y puede dirigir a otros robots menos inteligentes. Hay diferentes tipos posibles de equipos heterogéneos. Los vehículos autónomos de aire y de tierra proveen la coordinación de equipos de robots de tierra con un helicóptero autónomo en miniatura. Los robots marsupiales representan otro tipo de un equipo cooperativo, heterogéneo de robots. Un equipo marsupial consiste en un robot grande, que lleva uno o varios robots más pequeños al sitio de tarea. Los robots pequeños están mejor protegidos en la bolsa, pueden conservar la energía o ser recargados durante el transporte. El robot grande puede servir como una estación de trabajo para mantener la comunicación con robots pequeños y con el teleoperador.

El control de multiagentes puede ser realizado como un control centralizado o distribuido. En el control centralizado, los robots son esencialmente semiautónomos, controlados por la computadora central que distribuye asignaciones, objetivos, etc., a los robots remotos. En el control distribuido, cada robot toma sus propias decisiones y actúa por separado. Desde luego, hay una gama de regímenes que no son totalmente centralizados o totalmente distribuidos; los robots pueden actuar recíprocamente con un controlador central para recibir nuevos objetivos, y luego funcionar por la duración de la misión de una manera distribuida.


La cooperación se refiere a cómo los robots actúan recíprocamente el uno con el otro en la persecución de una meta.

El objetivo define como el robot de un equipo de multi-

agentes trabaja sobre una meta. Si todos los robots del equipo trabajan en el logro del mismo objetivo explícito, ellos comparten un objetivo común. Si cada robot del equipo está programado para su propio trabajo, él tiene un objetivo individual. Se están investigando dos tipos de realización de objetivo común: cada uno de los robots del equipo está coordinado por una estación de trabajo central mientras éstos realizan su navegación autónoma o alcanzan el objetivo común como resultado de comportamientos individuales.

Un problema nuevo que se engendra por colecciones de multiagentes es la emergencia del comportamiento social. Son conocidos dos enfoques: crear reglas sociales que los robots deben seguir, y permitir motivación interna que cause a los robots una adaptación de su comportamiento a los problemas. Las reglas sociales definen el comportamiento de cada miembro del equipo que le permite alcanzar su meta propia y la meta común. La dinámica de grupo podría surgir en las manadas de multiagentes que funcionan con el control totalmente distribuido usando la arquitectura de Subsunción Subsuposición. Los robots redujeron la interferencia haciendo papeles simples sociales sin comunicación, pero los miembros del equipo activamente no podían echar una mano a los colegas fracasados o cambiar tareas dinámicamente.

Otra situación es cuando los miembros del equipo pueden observar "u oír" el progreso de otros en el equipo, así como su propio progreso. Si ellos están frustrados con su propio progreso, deberán parar lo que están haciendo y seguir adelante con algo más. De la misma manera, si un robot está libre y otro robot ha sido incapaz de lograr una tarea, este deberá tratar de completar la tarea inacabada. Estos cambios de comportamientos están regulados por un mecanismo de motivación. La motivación de un robot para hacer una tarea está regulada por dos motivaciones internas, la impaciencia del robot y el consentimiento del robot. La impaciencia corresponde a la inspiración del robot para realizar el trabajo concreto solo. El consentimiento corresponde a la concesión de aceptar ayuda de otro robot. Cuanto un robot consigue el funcionamiento de otro robot sobre una tarea, tanto más alta la impaciencia asociada con aquella tarea. De la misma manera, cuanto más frustrado un robot con su propio funcionamiento para una tarea, tanto más alto el consentimiento. Si el umbral de frustración es excedido, entonces el robot asume la tarea inacabada o abandona su tarea y cambia el comportamiento.

Está claro que el comportamiento social se relaciona con problemas muy complejos. Por esto hasta hoy se investigan las tareas parciales de la emergencia del comportamiento social de los equipos de robots simples 

Vitaliy Rybak