

8 COORDINACIÓN DE ACCIONES

Una de las definiciones más aceptadas es la que la considera como la tarea de gestionar las dependencias existentes entre las actividades de los agentes. Como ya se dijo en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la función de coordinación es a su vez sustento y resultado del resto de funciones y roles del sistema multiagente. El presente capítulo revisa la importancia de esta dimensión de los sistemas multiagente partiendo de las formas clásicas hasta presentar las nuevas tendencias y modelos de coordinación.

8.1 Definición de tareas de coordinación : una visión general

Se denominan tareas de coordinación a aquellas acciones, no directamente productivas, que mejoran la eficiencia total del sistema.

Este tipo de tareas pertenecen al sistema organizativo y son de gran importancia para asegurar la cooperación entre agentes autónomos.

Las razones y situaciones que las hacen necesarias son:

- Algunos agentes necesitan información y resultados que sólo otros agentes pueden darles.
- Los recursos son limitados.
- Debe intentarse optimizar costes de operación.
- Los agentes deben tener objetivos separados pero interdependientes.

Los agentes coordinan sus acciones con el fin de gestionar las dependencias existentes entre sus actividades. La Figura 1 representa la división de estas dependencias propuesta en (Malone y Crowson, 1994).

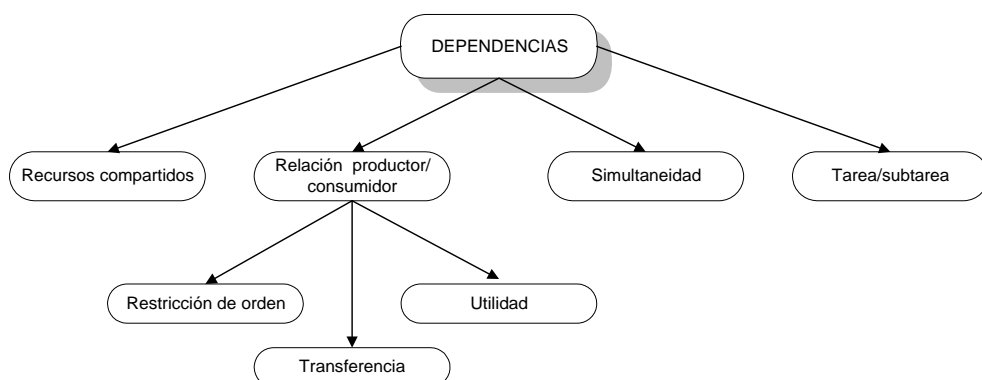


Figura 1: Clasificación de dependencias entre actividades (Fuente: Malone y Crowson, 1994).

Los mecanismos de coordinación dan forma al modo en que los agentes pueden realizar estas tareas de coordinación. La coordinación de acciones se basa en la relación que los agentes establecen con el espacio y el entorno, así como, la percepción que tienen de estos.

Para abordar un problema de coordinación, es necesario identificar, en primer lugar a los agentes con los que uno debe coordinarse y, a continuación, manejar las interdependencias existentes entre los conjuntos de acciones. El modelado de esta situación mediante un conjunto de ecuaciones permite la resolución mediante técnicas heurísticas.

El tipo de relación existente entre las acciones de los agentes permite organizarlas y mejorar su coordinación. Si las acciones se coordinan de forma centralizada, las relaciones entre ellas se determinan fácilmente. Por el contrario, si la coordinación es totalmente distribuida, las relaciones entre las acciones son difíciles de determinar hasta una vez estas han tenido lugar.

El esquema siguiente (Figura 2) resume las posibles relaciones a darse entre las acciones.

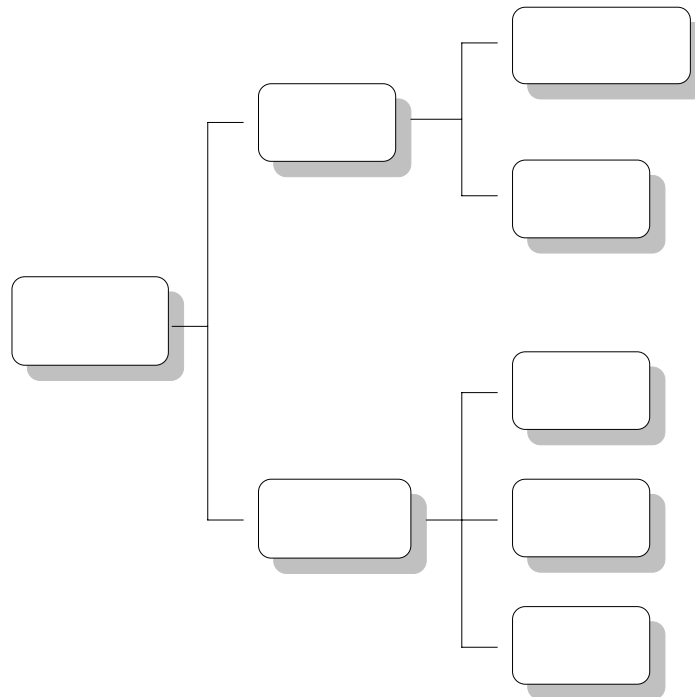


Figura 2: Esquema de relaciones entre las acciones de los agentes (Fuente: Ferber, 1999).

Las situaciones de coordinación son muy complejas. Esta complejidad se pone de manifiesto, por ejemplo, cuando la coordinación de dos agentes requiere que las acciones de uno de ellos estén terminadas, y con resultados definitivos, para que empiecen las del otro. Quedaría aún por determinarse por cuál de los métodos disponibles el primer agente resolverá su tarea (dando lugar a distintos resultados en cuanto a tiempo empleado y calidad se refiere). Puede incluso que estas variables de tiempo y calidad no sean conocidas sino que vengan expresadas estocásticamente. También puede ocurrir que el segundo agente tenga una información errónea o una representación del mundo que no se corresponde con la situación actual.

Relación
negativa

Ante la existencia de diversas alternativas para la toma de decisiones de coordinación, debe razonarse a un “metanivel” donde se contemplen todos los aspectos de coste computacional, necesidades de recursos de comunicación, retraso total en la toma de decisión, optimalidad del modelo de coordinación elegido, etc. Un posible enfoque para conseguir el diseño efectivo y eficiente de las estrategias de coordinación es considerando los beneficios obtenidos desde una perspectiva cuantificable (Lesser, 1999), perspectiva que se da al nivel más básico de la estructura para arbitrar así las actividades emanadas de niveles superiores no cuantitativos.

El resultado de la coordinación y la calidad de la misma se conciben de distintas formas según el nivel de granularidad considerado. Así pues, desde una perspectiva a micronivel, la coordinación puede entenderse como una forma de adaptación al entorno. Por ejemplo, la adaptación de los planes de los agentes ante la entrada de uno nuevo en el sistema. A este nivel, los resultados de coordinación son tanto mejores cuanto más acercan el agente a la consecución de sus objetivos en el entorno MAS.

Desde una perspectiva a macronivel, el resultado de la coordinación puede concebirse como un plan global. La calidad de este puede evaluarse según el tiempo empleado y el grado de consecución del objetivo del sistema o de la funcionalidad deseada.

El modelo de coordinación de dependencias aparece particularmente apropiado para establecer las bases racionales del comportamiento de coordinación observado. El conjunto de las interacciones posibles se llama a menudo espacio de interacción de coordinación.

Existen numerosos enfoques que tratan de modelar el espacio de interacción, tanto directamente, haciendo asunciones sobre el comportamiento y conocimiento del agente, como indirectamente, modificando el contexto del agente en su entorno. Algunos de estos mecanismos hacen referencia a aspectos de planificación, negociación, estructuras organizativas, convenciones, normas, gestión de la reputación, mecanismos de diseño, etc. La aplicabilidad de los mismos depende enormemente de las características del problema de coordinación.

Desde este punto de vista, (Ossowski y Omicini, 2002) distinguen una serie de propiedades que permiten caracterizar los modelos de coordinación.

Previo a la exposición de estas propiedades, es importante señalar que la adecuación de un modelo de coordinación u otro depende fuertemente del tipo de entorno al que se vaya a aplicar. Así, conseguir buenos niveles de coordinación en entornos abiertos es complejo. Ya que el comportamiento de los agentes es incontrolado y se sabe poco del mismo.

8.1.1 Dimensiones de caracterización de los modelos de coordinación

- Centralización/Descentralización.

Esta dimensión atiende a la forma de diseño de los modelos de coordinación.

Los mecanismos centralizados son adecuados para entornos cerrados con coordinación en tiempo de diseño. Los descentralizados cubren las necesidades de los entornos abiertos con coordinación en tiempo de ejecución.

- Acoplamiento/Desacoplamiento.

Un mecanismo de coordinación se denomina acoplado si la efectividad del comportamiento del agente se basa en asunciones sobre el comportamiento de otros agentes. Por el contrario, un mecanismo es desacoplado si no impone ninguna asunción en el comportamiento de los otros agentes. Una coordinación verdaderamente descentralizada sólo puede conseguirse mediante un mecanismo acoplado, de modo que soporte la carga adicional de asegurar que todos los agentes involucrados se comporten como se espera.

- Enfoques cuantitativos/cualitativos.

Los enfoques cualitativos siguen básicamente un modelo de dependencia que representa directamente las distintas razones para preferir o no ciertas acciones o elementos de coordinación frente a otros.

En los modelos cuantitativos, por el contrario, la estructura del problema de coordinación se oculta en la forma de una función de utilidad multiatributo. El enfoque cuantitativo se apoya en teorías como la Investigación Operativa o la Teoría de Juegos, pero la función de utilidad no es más que una aproximación, por lo que su óptimo no tiene porqué coincidir con el real, tal y como sucede siempre con los modelos.

Los mecanismos de coordinación basados en modelos cualitativos son menos propensos a ese tipo de inexactitudes de modelo, pues se fundamentan en las ciencias sociales, las cuales no proporcionan un marco formal especialmente adecuado para guiar la toma de decisiones local.

- Enfoques objetivos/subjetivos.

Esta característica está muy relacionada con la dualidad micro/macronivel. La coordinación subjetiva considera las interacciones desde el punto de vista del propio agente. Por su parte, la coordinación objetiva concibe la interacción en el sistema MAS desde un punto de vista exterior a los agentes interactuantes. La coordinación consiste en influir en las interacciones de los agentes de modo que la consecuente evolución del sistema se dirija hacia los objetivos del diseñador.

Los siguientes apartados presentan modelos de coordinación concretos, estudiándose primero los modelos clásicos de coordinación desarrollados para el ámbito de los sistemas multiagente y a continuación, aquellos modelos propuestos desde el ámbito de la informática. Estos últimos ponen de manifiesto la enorme influencia que esta rama de la ciencia ha tenido en el desarrollo de la coordinación en los sistemas multiagente.

8.2 Formas clásicas de coordinación

Se presentan a continuación algunas de las formas clásicas de coordinación empleadas en sistemas multiagentes.

- Coordinación por sincronización.

Se trata del método más elemental y la forma de coordinación de más bajo nivel. Se usa para dirigir la concurrencia de varias acciones y verificar la coherencia de sus resultados. Sus

problemas y algoritmos tienen su origen en los sistemas distribuidos, por lo que la adaptación a sistemas multiagente es inmediata.

- Coordinación por planificación.

Técnica tradicionalmente usada en inteligencia artificial. Se basa en la división de las acciones en dos fases, una para concebir un plan y la otra para seleccionarlo. Estos métodos permiten llevar a cabo tareas de coordinación de alta calidad, si bien no pueden manejar situaciones imprevistas o hartamente complejas.

- Coordinación reactiva.

Consiste en la implementación de mecanismos de coordinación que se basan en agentes reactivos. En lugar de planificar acciones e interacciones *a priori*, como en los primeros métodos, esta técnica se implementa in situ.

- Coordinación por regulación.

Método usado en sistemas que requieren una coordinación muy limitada. Consiste en definir un conjunto de normas de conducta que indican lo que es correcto. Gracias a estas normas se evitan posibles conflictos. Es un método raramente usado.

8.2.1 Coordinación por sincronización

Sincronizar varias acciones es definir la relación temporal existente entre ellas. La sincronización de acciones puede considerarse como la coordinación de más bajo nivel.

La sincronización de movimientos tiene lugar cuando varios elementos deben moverse juntos. La coordinación es entonces un problema de ritmo y situación de las acciones en el tiempo.

Uno de los formalismos más usados en el ámbito de la sincronización es el de las redes de Petri. La sincronización del acceso a un recurso es un caso claro de su necesidad y uso. Para la implementación en un sistema multiagente, el propio recurso se puede considerar como un agente con el que se intercambian mensajes para saber su disponibilidad. El recurso debe asignarse a aquellas tareas de mayor prioridad y, en su caso, evitar la interrupción de la susodicha tarea para la que ha sido asignado.

Una forma de solucionar el problema de dos agentes queriendo acceder a un recurso al mismo tiempo, consiste en: modelar cada uno de los agentes y el propio recurso mediante redes de Petri. El funcionamiento consiste en disparar el acceso al recurso cuando este se encuentre libre y alguno de los agentes lo solicite. De esta forma se establecen turnos y se evita que un agente intente acceder al recurso cuando ya está siendo utilizado.

8.2.2 Coordinación por planificación

La coordinación de acciones mediante planificación usa los resultados de la planificación en el caso de un único agente.

El hecho de pasar de un único agente a un conjunto de los mismos hace que aumente el número de posibles situaciones imprevistas, por lo que el módulo de ejecución de acciones debe tener un comportamiento más reactivo.

8.2.2.1 Extensión de los modelos vistos para un único agente a MAS

Las hipótesis necesarias para la aplicación del modelo de STRIPS (Fikes y Nilsson, 1971), presentado en apartados anteriores, dejan de ser válidas. Estas hipótesis suponían la aplicación secuencial de los operadores y no consideraban el transcurso del tiempo. No obstante, debido a su elevada difusión y a pesar de lo expuesto, se aplican a sistemas multiagente.

Ya se dijo también que las acciones podían verse como procesos, y estos a su vez, como autómatas. De forma que, cada estado del autómata representa un estado del mundo (definido por una serie de fórmulas atómicas) y las transiciones representan las posibles acciones de los agentes.

Este último enfoque hace posible la combinación de procesos para formar secuencias, interacciones o composiciones paralelas. El formalismo más adecuado, y que permite una mayor sencillez en el manejo posterior de estas estructuras, es el de las redes de Petri.

8.2.2.2 Modos de planificación en MAS

La planificación de acciones en los sistemas multiagente se divide en tres bloques: creación de planes, coordinación/sincronización de planes y ejecución de los mismos.

Como consecuencia de esta división, un sistema de planificación se compone de un conjunto de agentes que son capaces de llevar a cabo estas tareas. La Figura 3 representa un esquema del sistema de planificación para un sistema multiagente. En ella, los distintos planos equivalen a diferentes agentes encargados de las tareas anteriores. Debe señalarse que un mismo agente puede llevar a cabo varias de estas tareas y no estar especializado en ninguna de ellas en concreto.

La organización de las mismas que se ponga en práctica (planificación centralizada o distribuida, coordinación centralizada o distribuida y posibles combinaciones) da lugar a los tres modos clásicos de organización de la planificación en un sistema multiagente:

- Planificación centralizada para múltiples agentes.
- Coordinación centralizada para planes parciales.
- Planificación distribuida.

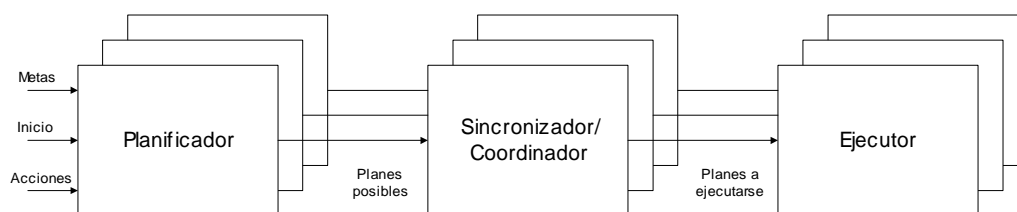


Figura 3: Planificación en un sistema multiagente (Fuente: Ferber, 1999).

Los siguientes apartados se dedican al estudio de estas formas de planificación.

8.2.2.2.1 Planificación centralizada para múltiples agentes

En este caso se considera la existencia de un único agente planificador que, como su propio nombre indica, planifica y organiza, además, las acciones del resto de agentes. Se encarga también de la sincronización de planes y la localización de las tareas.

Los pasos a seguir para la construcción de un plan centralizado son:

- Búsqueda de un plan parcial general.
- Determinación de los procesos que puedan ejecutarse en paralelo. Establecimiento de puntos de sincronización para los mismos.
- Localización de las tareas en los agentes implicados.

8.2.2.2.2 Planificación con coordinación centralizada para planes parciales

Es posible centralizar únicamente la coordinación de los planes parciales trazados por distintos agentes.

Si estos planes vienen representados mediante redes de Petri, la puesta en común puede dar lugar a las siguientes situaciones:

- Independencia de acciones: no existe posibilidad de unión entre las redes parciales, por lo que no se hace modificación alguna a las redes originales.
- Relación positiva entre las acciones: no existen puntos de conflicto entre los planes parciales. Para obtener el plan general, basta con superponer las redes anteriores.
- Relación negativa entre las acciones: en este caso existen sinergias y conflictos entre los planes parciales. Se necesita llevar a cabo la adecuada coordinación y sincronización de las acciones, de forma que puedan alcanzarse los objetivos parciales iniciales.

8.2.2.2.3 Planificación con coordinación distribuida para planes parciales

La gran dificultad de este enfoque reside, no sólo en la resolución de los conflictos a aparecer, sino en la detección de las sinergias que pueden hacer que determinadas acciones de un agente favorezcan a otro en la consecución de sus metas.

El Modelo de Planificación Parcial Global (*Partial global planning*, PGP) representa un marco general para este problema (Lesser y Durfee, 1991)

La elevada complejidad de esta perspectiva hace imposible alcanzar el óptimo en algunas ocasiones. Se usan entonces técnicas heurísticas que permiten resolver el problema de forma aproximada.

8.2.3 Coordinación reactiva

Consiste en actuar directamente sin planificación previa. En este caso, toda la información relativa al comportamiento de los agentes se encuentra en el entorno, ya que estos carecen de representación alguna del mundo.

Pese a su simplicidad, los agentes reactivos poseen un gran potencial derivado de su capacidad para trabajar en grupo.

Ya se comentó la definición del comportamiento de un agente en términos de acciones situadas. Cuando en lugar de un solo agente, se tienen varios de ellos, se originan situaciones de cooperación.

Según como sea la relación existente entre los objetivos de los agentes implicados, se producen distintas situaciones de cooperación más o menos problemáticas.

- Agentes con objetivos independientes.

En este caso, los problemas posibles se derivan del hecho de que dos agentes quieran acceder al mismo tiempo a una cierta región del espacio o a un recurso limitado. Los problemas de acceso al espacio pueden solucionarse con campos potenciales de atracción/repulsión. Los mecanismos de sincronización, por su parte, resuelven las dificultades en el acceso a herramientas comunes.

- Agentes con objetivos dependientes.

Las dificultades propias de esta situación son bastante especiales, ya que en este caso, las acciones de algunos agentes favorecen a otros. Como consecuencia de lo anterior, se mejora la representación global del grupo. Las técnicas usadas para solucionar las posibles trabas a aparecer, se basan en la capacidad de los agentes para reaccionar a cambios en el entorno. Así pues, se usan campos vectoriales (que guían los movimientos de los agentes) y se introducen marcas en el entorno (que permiten coordinar las acciones de los agentes).

Una forma reactiva de coordinación es la de marcado del entorno. Una marca es un signo material que modifica el entorno de forma artificial. Las marcas pueden ser depositadas, leídas y borradas por los agentes. Los efectos de las mismas desaparecen gradualmente en el tiempo.

El uso de marcas para indicar la tarea que está desempeñando un agente, o los recursos a los que está accediendo, permiten la cooperación y coordinación de las acciones de este con las del resto de individuos. Esto conlleva una mejora en el desempeño de la función global y nivel de representación del sistema.

No obstante, la coordinación de los agentes es posible aun no habiendo marcas en el entorno. En ese supuesto, además de las acciones de sincronización, se hace necesaria la introducción de acciones de coordinación.

8.3 Modelos de coordinación desde el punto de vista de los lenguajes de programación

El objetivo de un modelo de coordinación y el lenguaje asociado es proporcionar los medios para integrar una serie de componentes, posiblemente heterogéneos, juntos, mediante la creación de interfaces entre cada componente, de modo que el conjunto colectivo forme una aplicación única que pueda ejecutarse y aprovechar las ventajas de los sistemas paralelos y distribuidos (Papadopoulos y Arbab, 1998).

Desde el punto de vista de los lenguajes de programación, el aprovechamiento del potencial ofrecido por los sistemas paralelos requiere modelos de programación que explícitamente tratan la concurrencia de operación entre gran número de entidades activas que se comprometen en una sola tarea o aplicación. Esto ha conducido al diseño e implementación de un gran número de modelos de coordinación y sus lenguajes de programación asociados.

Todos estos modelos desarrollados tienen el mismo objetivo, proporcionar un marco que amplíe la modularidad, reutilice los componentes ya existentes y proporcione portabilidad e interoperabilidad. En cualquier caso, también se diferencian en cómo definen el concepto de coordinación, qué es exactamente lo que se coordina, cómo se consigue la coordinación y cuáles son las metáforas empleadas.

Tradicionalmente, estos modelos y lenguajes de coordinación pueden clasificarse en dos categorías:

- Orientados a datos. En este caso, la evolución de la computación es debida a los tipos y propiedades de los datos involucrados en el proceso de coordinación.
- Orientadas a control o proceso. En este caso, los cambios en el proceso de coordinación se disparan por eventos que generan cambios en los estados de los procesos coordinados.

8.4 Paradigma de la coordinación desde el punto de vista de la programación

El paradigma de coordinación permite atacar aspectos relacionados con el desarrollo de sistemas de computación complejos y distribuidos.

La programación de uno de estos sistemas incluye dos tipos de actividades distintas: por un lado, una parte de computación (contiene procesos involucrados en la manipulación de datos), y por otro, parte de coordinación (responsable de la comunicación y cooperación entre los procesos).

Una de las definiciones de coordinación más generales y de mayor aceptación en distintos ámbitos es la que define como gestión de las dependencias entre actividades. Esta definición es válida para numerosos campos de la ciencia tales como la programación, los sistemas multiagente, la economía o la biología entre otros.

En el área de los lenguajes de programación, probablemente, la definición más aceptada sea la que la contempla como proceso de construcción de programas que permite unir o relacionar distintos procesos entre sí (Carriero y Gelernter, 1992).

Muy relacionado con el concepto de coordinación está el de configuración y descripción de la arquitectura. Los lenguajes de configuración y descripción de la arquitectura comparten los mismos principios que los de coordinación. Estos ven al sistema constituido por componentes e interconexiones, y su objetivo es separar la descripción estructural de los componentes del comportamiento de estos. Además apoyan la formación de componentes complejos a partir de la composición de componentes más elementales. En caso de adoptarse una visión relajada de lo que es la coordinación, estos dos lenguajes pueden incluirse dentro de la categoría de lenguajes de coordinación.

8.5 Primeros modelos de coordinación y lenguajes

Existen numerosas dimensiones según las cuales se pueden clasificar estos modelos y lenguajes, tales como el tipo de entidades que se coordinan, las arquitecturas y lenguajes subyacentes, semántica empleada por el modelo, aspectos de escalabilidad, apertura, etc. En esta introducción se sigue la división tradicional entre modelos orientados a datos y procesos.

8.5.1 Modelos orientados a datos (*Data-driven*)

En los modelos orientados a datos, el estado de la computación en cualquier momento se define en términos de los valores de los datos enviados o recibidos y la configuración de los componentes coordinados. Es decir, un coordinador o proceso de coordinación es responsable tanto de examinar y manipular los datos, como de coordinarse a sí mismo y/u otros procesos mediante la invocación al mecanismo de coordinación que cada lenguaje proporciona. Esto sugiere que, al menos, en cuanto a estilo, existe una mezcla de código de coordinación y de computación dentro de la definición de un proceso. Esto quiere decir que los procesos no pueden fácilmente distinguirse como de coordinación o computacionales.

8.5.1.1 Espacio de datos compartidos

Todos los modelos incluidos en esta categoría han evolucionado alrededor del concepto de Espacio de datos compartidos (*Shared Dataspace*). Este puede definirse como una estructura de datos común y de contenido direccionable. Todos los procesos involucrados en algún tipo de computación pueden comunicarse entre sí sólo indirectamente a través de este medio.

El espacio de datos compartido tiene un doble papel, por un lado es un repositorio de datos global y también es un medio de comunicación interprocesal.

8.5.1.2 Modelos destacados

Los distintos modelos basados en *Shared Dataspace* se diferencian en diversos aspectos que pueden hacer referencia a parámetros, tales como la estructura de datos (planas, anidadas, etc.). Algunos modelos se basan en distintas formas de casar patrones, otros usan técnicas más sofisticadas que consideran al medio compartido como algo más que un espacio plano desestructurado. Otra distinción hace referencia a aspectos de referencia de localización dentro del medio compartido, seguridad y eficiencia.

El miembro más destacado de esta familia es Linda, donde el medio común es un espacio en el que se albergan las tuplas, objetos de datos creados por los procesos. Este medio común es empleado por los procesos para enviar o retirar tuplas según necesiten. Un cierto número de modelos de coordinación basados en espacios de datos compartidos han sido propuestos, donde se enfatizaba el hecho de proveer una semántica más explícita para la gestión de tuplas.

8.5.2 Modelos orientados a proceso (*Control-driven*)

En el caso de los modelos *control driven* existe una separación casi completa de la coordinación y de los aspectos de computación.

Con ello se quiere decir que los componentes de coordinación están casi completamente separados de los computacionales. Esto se consigue habitualmente definiendo un nuevo lenguaje de coordinación donde las partes computacionales se tratan como cajas negras con interfaces de entrada/salida claramente definidas. De forma natural, estas conexiones son punto a punto, si bien se permite una funcionalidad de difusión limitada. Los procesos también pueden enviar mensajes de control al entorno o eventos con el objetivo de permitir a otros procesos interesados conocer en qué estado se encuentran o informar a estos sobre cualquier cambio de estado.

La categoría *control driven* suele ser más usada para el modelado de sistemas, debido a que tiende a coordinar procesos, frente a los modelos tipo *data driven* que coordinan datos.

En la categoría de los modelos *data driven*, el componente de coordinación tiene en consideración los datos manipulados mientras que en *control driven*, la estructura actual y los contenidos de los datos son de poca o ninguna importancia.

Algunos modelos incluidos en esta línea son TOOLBUS o MANIFOLD.

8.6 Influencia de la www

Internet es uno de los ámbitos más atractivos y naturales para el empleo de la tecnología de agentes, debido a la gran cantidad de información disponible y los servicios ofrecidos. Todos los agentes deben interactuar entre sí con el objetivo de intercambiar información, colaborar o gestionar entornos heterogéneos.

El desarrollo de la red de redes posibilitó la disponibilidad de una gran cantidad de información. En esta red, los datos y documentos potencialmente interesantes se encuentran distribuidos por todo el mundo, por lo que es natural estudiar cómo la computación sobre tales datos puede también ser distribuida por todo el mundo. Los agentes software aparentan ser la solución perfecta a este problema.

Durante los primeros años de la web, numerosas plataformas basadas en MAS nacieron mediante la combinación de Java y el lenguaje de coordinación para construir agentes software para la www.

El rápido desarrollo de la programación orientada a objetos y las redes de área extensa ha llevado a la integración de ambas tecnologías y la formación de plataformas de computación distribuida basadas en objetos. Esto ha dado lugar al desarrollo de varios juegos de herramientas para agentes, típicamente, basados en Java.

8.7 Clasificación y revisión de tendencias

Uno de los principales aspectos que se tienen en cuenta cuando se definen e implementan MAS para aplicaciones en el mundo real son las relaciones sociales de los mismos. Los aspectos sociales hacen referencia a dependencias interagente, a la configuración del sistema en términos de medios de interacción básicos, generación/destrucción de agentes y organización del entorno.

Los distintos enfoques para la coordinación influyen de forma diferente en la definición y construcción del MAS. Para estudiar estas relaciones, sería adecuado disponer de un marco conceptual que sirviera de base de comparación. Han sido varios los modelos propuestos para considerar los aspectos de coordinación en un MAS (Bergenti y Ricci, 2002), (Bocchi y Ciancarini, 2003).

Un modelo genérico de coordinación es establecido en (Bergenti y Ricci, 2002). Este modelo consta de los siguientes elementos:

- Coordinables: objetos de la coordinación.
- Medio de coordinación: permite la interacción entre los coordinables.
- Leyes de coordinación: incluye las reglas que gobiernan la interacción entre los medios de coordinación y los coordinables, así como las normas que emplea el medio de coordinación.

Estos mismos autores proponen una posible clasificación de las soluciones o enfoques considerados para tratar el aspecto social de los MAS. Su propuesta distingue:

- Modelos de coordinación híbrida basados en centros de tuplas.
- Protocolos de interacción como medio para coordinar agentes.
- Coordinación implícita mediante las semánticas de los ACL clásicos.

8.7.1 Modelos de coordinación híbrida basados en centros de tuplas

Los modelos de coordinación basados en centros de tuplas tienen su origen en los lenguajes de programación para sistemas paralelos y distribuidos. El objetivo era promover una separación clara entre la especificación de los componentes y la especificación de las relaciones de interacción y dependencia que se dan entre ellos. Esta idea favorece la reutilización tanto de los componentes como de las especificaciones de coordinación.

La evolución de estos primeros modelos trató de buscar lenguajes de comunicación más complejos, topologías más elaboradas para el medio de coordinación, o medios de coordinación más expresivos y con mayores posibilidades.

La programabilidad del medio de coordinación es la característica clave de los modelos de coordinación híbrida.

Los modelos híbridos proporcionan las ventajas tanto de los modelos orientados a datos como las de los modelos orientados a control. Estas características hacen que los modelos híbridos sean muy adecuados para los MAS, ya que consideran la dimensión social del sistema un elemento de primer orden.

Los centros de tuplas pueden entenderse como máquinas virtuales de coordinación de propósito general. De forma que las tareas, las normas sociales y las restricciones globales pueden especificarse como leyes de coordinación y encapsularse como especificaciones de comportamiento de los centros de tuplas.

Identificando este enfoque con el modelo genérico anteriormente presentado, podría establecerse, a modo de ejemplo, la siguiente correspondencia: los coordinables son los agentes que usan un lenguaje de comunicación tipo Linda para interactuar, el medio de coordinación son los centros de tuplas y las leyes de coordinación se corresponden con los programas usados para especificar el comportamiento de estos centros de tuplas.

8.7.2 Coordinación por medio de protocolos de interacción

La coordinación basada en protocolos de interacción se basa en considerar a esta como un problema esencial de comunicación.

Algunos ACL han sido diseñados para soportar la naturaleza social de los agentes. Así, un ACL puede usarse para permitir a los agentes pedir apoyo de otros agentes y para conseguir un objetivo colectivo, monitorizar la ejecución de un agente, declarar el estado de alguna computación, organizar asignación de tareas, etc. Los ACL ofrecen la posibilidad de formular patrones básicos de coordinación.

Los más importantes son KQML y FIPA ACL. Ambos se apoyan en la comunicación de mensajes asíncronos.

La estructuración de los mensajes en términos de *performatives* y contenido nace de la teoría de los actos de habla, y se ha reconocido recientemente como un medio para conseguir un elevado nivel de interoperabilidad entre los agentes. Esta estructura particular sugiere un modo para describir los protocolos de interacción.

Clásicamente, un protocolo de interacción se apoya en un conjunto de roles que desempeñan los agentes participantes en el protocolo. Estos roles se describen como una máquina de estado finito en la que los estados identifican estados globales del protocolo y las transiciones representan mensajes que se etiquetan con identificadores de rol y *performatives*. Un ejemplo de esto lo constituye la Red de Contratos FIPA.

Volviendo a establecer una analogía entre los protocolos de interacción y el modelo de coordinación genérica se tiene que: los coordinables son los agentes, el medio de coordinación el ACL y las leyes de coordinación se expresan a través de una FSM que describe el protocolo.

Con una filosofía contraria, pero que también pone en relación los aspectos comunicativos y de coordinación de un MAS, (Gouaich, 2004) propone un marco en el que los protocolos de conversación se derivan de los de coordinación.

8.7.3 Coordinación por medio de las semánticas de un ACL

Según (Bergenti y Ricci, 2002), para mostrar cómo las semánticas de un ACL implican un modelo de coordinación, basta con considerar la semántica de FIPA ACL.

FIPA asocia un significado a un mensaje en términos de precondiciones de admisibilidad (*Feasibility Precondition*, FP) y efectos racionales (*Rational Effect*, RE). La disponibilidad de FP y RE son suficientes para que un agente decida de forma autónoma cuándo enviar qué mensaje.

Si un agente tiene un objetivo que encaja con determinados RE de un mensaje, entonces el agente está pendiente de enviar ese mensaje. Para conseguirlo, deben darse las FP asociadas a dicho mensaje, por lo que dicho agente tratará de propiciar que estas sucedan marcándose esto como subobjetivo previo. Esta es la técnica clásica de construcción dinámica de un plan.

En consecuencia, estas semánticas definen implícitamente un modelo de coordinación por la construcción dinámica de planes que tiene en cuenta a otros agentes y se coordina, de forma implícita, con ellos.

Como en apartados anteriores, la analogía del enfoque presentado con el modelo genérico inicial establece que los coordinables vuelvan a ser los agentes, el medio el ACL y las leyes de coordinación estén implícitamente expresadas en las semánticas del ACL.

8.7.4 Valoración de los tres enfoques

En cuanto a los modelos basados en centros de tuplas, estos son particularmente adecuados para la coordinación de agentes móviles en entornos dinámicos y abiertos, como por ejemplo, Internet.

La mayor parte de las críticas que sufre este enfoque es que induce alguna forma de centralización en el MAS. El espacio de interacción global es concebido, por estos modelos, como la multiplicación de contextos de interacción independientes, organizados según topologías que dependen del modelo específico.

Los protocolos de interacción son en general muy criticados. Más que la idea, se critica la descripción en términos de máquinas de estado finito. El problema de esta descripción es que no considera formalmente el contenido del mensaje y no proporciona mecanismos para acortar el protocolo en casos favorables. Además, es complicado verificar si los mensajes cumplen con las semánticas del ACL.

Otras críticas hacen referencia al acoplamiento característico entre coordinación y computación de estos protocolos. En estos enfoques, el código del agente se entrelaza con el de apoyo a la coordinación.

El estudio de las capacidades de coordinación basadas en la semántica de los ACL tiene una importante dificultad, que es el elevado nivel de capacidades que requiere de los agentes, pues estos deben integrar dentro de sí un planificador con todas las características.

En cualquier caso, la coordinación basada en las semánticas proporciona un modo de coordinación orientado a meta pura, es decir, la interacción es realizada sólo para conseguir objetivos y no es una actividad en sí misma. Este enfoque engloba, según el punto de vista, a los protocolos de interacción, ya que los agentes pueden usar las semánticas del ACL para ensamblar protocolos de interacción sobre la marcha.

8.8 Otros modos de coordinación

El creciente desarrollo de los sistemas multiagente y su aplicación a diversos ámbitos de la ciencia y la industria favorece el desarrollo de nuevas técnicas de coordinación. Los siguientes apartados presentan algunos de esos modos de coordinación.

8.8.1 Compromisos sociales

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la comunidad MAS es asegurar la coordinación entre agentes autónomos en MAS heterogéneos y abiertos. Para poder coordinarse, los agentes deben interactuar entre sí, como ya se ha dicho.

Los compromisos sociales se han empleado en los últimos años para permitir a agentes heterogéneos comunicarse e interactuar exitosamente. Una de sus principales ventajas es que, con ellos, no se asume nada sobre el modelo interno de los agentes. No obstante, llevar a cabo la coordinación de agentes sólo mediante modelos de interacción es difícil en MAS abiertos, donde es posible que agentes malévolos puedan entrar y violar las normas.

Por otra parte, las organizaciones de agentes, instituciones y sistemas normativos se han usado para controlar el modo en que los agentes interactúan y se comportan.

Los dos enfoques, el basado en compromisos sociales y el organizativo, pueden unirse como un modelo único de coordinación en MAS. Los primeros pasos para unir ambos métodos han sido ya presentados (Carabelea y Boissier, 2006), indicando cómo el comportamiento esperado de un agente que desempeña un rol en una organización puede describirse mediante compromisos sociales. Pueden definirse entonces roles y estructuras organizativas que usan compromisos sociales, que pueden ser útiles tanto para la organización como para el agente. Así pues, un agente puede utilizar el mismo modelo (compromiso social) para representar sus comunicaciones e interacciones con otros agentes como para representar su comportamiento esperado desempeñando un rol. Como este modelo explicita la violación de un compromiso, una organización puede usarlo también, para detectar fácilmente a agentes autónomos y sancionarlos.

8.8.2 Artefactos de coordinación

Al contrario que los enfoques estándar basados en ACL, la coordinación basada en el entorno es una alternativa emergente e interesante para la estructuración de la interacción de los MAS. En particular, la noción de los artefactos de coordinación se ha propuesto como una metodología de ingeniería para la construcción de abstracciones efectivas en tiempo de ejecución que proporcionen agentes colaboradores con tareas de coordinación específicamente diseñadas (Viroli et al., 2006).

Los artefactos de coordinación son dispositivos computacionales que se encuentran en el entorno del agente y que han sido diseñados para proporcionar algún tipo de funcionalidad o servicio, de forma que los agentes los usen para conseguir sus objetivos locales o globales. Al contrario que los agentes, los artefactos de coordinación carecen de metas internas y sus funciones pueden asimilarse, según los casos, a bases de datos o pizarras, por ejemplo.

Junto con los agentes, los artefactos se consideran un bloque básico para la construcción, análisis y desarrollo de un MAS (Omicini et al., 2006). Desde este punto de vista, los artefactos de coordinación son una abstracción esencial para la construcción de actividades sociales en el sentido de que permiten y median en la interacción entre agentes y gobiernan las actividades sociales regulando el espacio de interacción.

8.8.3 Optimalidad secuencial

La coordinación de las actividades de los agentes también es un problema complicado cuando se aborda desde el punto de vista matemático. Englobado en un contexto de decisión teórico mayor, la existencia de los problemas de coordinación conlleva una dificultad en la evaluación de la utilidad de una situación. A su vez, esto hace problemática la definición de políticas óptimas para procesos de decisión secuenciales.

Se ha propuesto (Boutilier, 1999) un método para resolver los problemas de decisiones secuenciales en MAS permitiendo a los agentes razonar explícitamente sobre los mecanismos de coordinación específicos.

Para ello, se define una extensión del valor de la iteración en la que el espacio de estados del sistema se aumenta con el estado de los mecanismos de coordinación adoptados. De este modo se permite a los agentes razonar a corto y largo plazo sobre la coordinación y las consecuencias posteriores que puede tener la mala coordinación. A partir de aquí y, según el valor esperado, el agente puede tomar decisiones para involucrarse en o impedir problemas de coordinación.

8.9 Otros aspectos : selección de compañeros y mecanismo de coordinación

Cuando múltiples agentes potenciales comparten un entorno de tarea, surgen generalmente interacciones entre los agentes. Un agente puede cambiar algunas características del entorno que, a su vez, provocan un cierto impacto sobre los otros agentes.

Existen diversas herramientas poderosas para la coordinación de agentes que ya saben con quién o sobre qué deben coordinarse. Sin embargo, existen aún numerosos aspectos que necesitan ser explorados para diseñar mecanismos eficientes mediante los cuales se pueda determinar qué necesidades son las que han de coordinarse, con quién se debe coordinarse y en qué orden se han de atender esas necesidades.

Aunque no hay demasiadas aportaciones en esta línea, algunas técnicas mediante las cuales los agentes puedan descubrir con qué otros agentes deben coordinarse, o sobre qué aspectos deben hacerlo han sido presentadas en (Durfee, 2002). A partir de aquí ya se puede utilizar las técnicas de coordinación que han sido presentadas en apartados anteriores.

No obstante, cabe preguntarse entonces qué técnica de coordinación debe emplearse. Generalmente, el mecanismo de coordinación a emplear viene predeterminado en la creación del sistema, de forma que este será utilizado ante cualquiera de las situaciones de coordinación que puedan aparecer. La selección dinámica de este mecanismo permitiría adaptar las respuestas del sistema a sus necesidades.

8.9.1 Red jerárquica de tareas

Los agentes ocupan un entorno abierto, dinámico y cada agente tiene sus objetivos independientes. En el intento de conseguir sus objetivos, un agente puede, de forma no intencionada, interferir con los otros agentes, algunas veces, con resultados catastróficos. Por este motivo, es importante descubrir, para cada agente, si es necesario coordinar la tarea que realiza con los otros agentes.

Las operaciones de las coaliciones, como ejemplo de dominio de aplicación en el que aparecen este tipo de problemas, son estudiadas en (Durfee, 2002). Con este ejemplo, se han desarrollado técnicas computacionales en las que cada equipo se representa por un agente computacional, y estos agentes predicen las interacciones no intencionadas y las resuelven antes de que ocurran. Los planes coordinados resultantes para los agentes deben ser eficientes, flexibles y realizables.

Conceptualmente, la técnica empieza asumiendo que cada agente representa sus planes como una red de tareas jerárquica (*Hierarchical Task Network*, HTN) que captura las posibles descomposiciones de los pasos de los planes abstractos en planes más detallados.

Una ventaja del uso de la representación jerárquica es que cada agente tiene, simultáneamente, un modelo de sí mismo a distintos niveles de detalle.

En un entorno abierto poblado por numerosos agentes, ser capaz de comunicarse e intercambiar información abstracta permite a los agentes determinar rápidamente con qué subconjunto de agentes podrían actuar en ese momento. Es posible incluso que los agentes impongan restricciones a un nivel más abstracto para asegurarse frente a colisiones no intencionadas. Por ejemplo, pueden imponerse restricciones de secuenciación de planes generales o intercambio de detalles adicionales del HTN para el resto de agentes.

Como consecuencia, agentes potenciales para interactuar acabarán no interactuando, reduciéndose el número de agentes en adelante. Además, la introducción de restricciones entre algunos subpasos de los planes, permite a los agentes hacer los otros subpasos tal y como deseen.

Así pues, este mecanismo implica el intercambio iterativo de planes de información, a niveles de detalle incrementales, para aislar interacciones potenciales e imponer compromisos efectivos para resolver conflictos.

8.9.2 Selección dinámica de mecanismos de coordinación

Como se ha mostrado a lo largo del documento, existen numerosos mecanismos de coordinación con distintas propiedades y características que resultan apropiados a diferentes tareas y entornos.

Estos mecanismos varían en el grado de imposición de los mismos en tiempo de diseño, la cantidad de tiempo y esfuerzo que necesitan para solucionar una situación de coordinación en tiempo de ejecución y el grado de éxito obtenido en la situación de coordinación.

Normalmente, un único mecanismo no se adapta a todas las posibles situaciones a darse en un MAS, por lo que la funcionalidad del sistema podría mejorarse si los agentes pudieran elegir dinámicamente el mecanismo de coordinación que más les conviene en cada caso. Esta idea es desarrollada en (Excelente-Toledo y Jennings, 2004) donde se define un marco que representa todos los elementos participantes en el proceso: agentes capaces de realizar tareas, tareas específicas asociadas a un agente, tareas que necesitan de la cooperación de varios agentes para su resolución y mecanismos de coordinación. De tal manera que puede modelarse cómo los agentes deciden si realizan tareas cooperativas y de qué modo participan.

UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MULTIAGENTE EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMPLEJOS: ESTUDIO Y REVISIÓN
