

Formación de coaliciones difusas en Sistemas Multiagente

M^a del Carmen Delgado, Pablo Cortés, Joaquín Fernández¹

¹ Grupo de Ingeniería de Organización. Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla. mdelgado@esi.us.es, pca@esi.us.es, joaferval@esi.us.es

Palabras clave: Formación de coaliciones, Sistemas Multiagente, Lógica Difusa

1. Introducción al estudio de la formación de coaliciones

El fenómeno de agrupación o formación de coaliciones entre distintos seres o entidades ha sido estudiado tradicionalmente en diferentes disciplinas de la ciencia y el conocimiento. Desde el punto de vista de las ciencias sociales, han recibido especial atención el estudio de la formación de coaliciones políticas o el efecto de la formación de grupos étnicos o religiosos en la sociedad.

Tomando inspiración en este fenómeno que se produce naturalmente entre los seres vivos, surge el problema de la formación de coaliciones entre robots o programas informáticos con computación distribuida. Como en las sociedades humanas, los robots o los elementos software establecen coaliciones y cooperan con el fin de realizar tareas, compartir información y/o conseguir metas o ganancias no alcanzables individualmente. Ejemplos de estas formaciones pueden encontrarse en aplicaciones para coordinación de sistemas multirobot, en redes de ordenadores y redes de sensores.

2. Formación de coaliciones en Sistemas Multiagente

La formación de coaliciones es un problema extensamente estudiado en microeconomía, teoría de juegos e informática, particularmente, en el ámbito de los Sistemas Multiagente, (Multiagent Systems, MAS). Un sistema multiagente es una colección de agentes inteligentes, considerándose un agente inteligente una entidad reactiva, proactiva, autónoma y social. El agente realiza tareas haciendo uso para ello de la información que recoge de su entorno.

- Los agentes de un MAS suelen caracterizarse por ser cooperativos o egoístas. En cualquier caso, debido a la naturaleza distribuida de los problemas que han de resolver o a las limitaciones de las capacidades de los mismos, tanto agentes clasificados como cooperativos, como los considerados egoístas, necesitan colaborar entre ellos para conseguir sus objetivos.
- Desde el punto de vista de los MAS, la formación de coaliciones es una forma de interacción fundamental que permite la formación coherente de grupos de agentes autónomos para conseguir de forma eficiente sus objetivos individuales y colectivos.

Las aproximaciones al estudio de la formación de coaliciones en MAS puede verse desde tres puntos de vista según Vig y Adams (2007):

- Formación de coaliciones para la realización de tareas, basado generalmente en el uso de estrategias de negociación.

La formación de coaliciones es una forma de interacción básica y de gran importancia para los MAS, puesto que numerosas aplicaciones de los mismos requieren que varios agentes se unan durante un cierto tiempo para resolver una determinada tarea y se separen una vez concluida esta. Los investigadores del ámbito de la Inteligencia Artificial Distribuida se han centrado en construir agentes capaces de cooperar para la ejecución de tareas, incrementando así tantos los beneficios individuales de los agentes como los del sistema.

Una de las primeras aproximaciones a la formación de coaliciones, aún vigente y utilizada en diversos enfoques posteriores, fue la propuesta por Smith (1980), basada en el concepto de negociación. Así, se propuso el denominado Protocolo de Red de Contrato, (Contract Net Protocol, CNP) según el cual, los agentes tratan de realizar una tarea dividiéndola en tareas menores y subcontratando para cada subtarea a otro agente mediante un mecanismo oferta/demanda.

- Estudio de la formación de coaliciones desde un punto de vista social, centrado en la emergencia de comportamientos.

Gasser (1993) estudia la formación de coaliciones centrándose en los aspectos sociales del conocimiento de los agentes y la acción dentro del MAS. Como en las sociedades humanas, los mecanismos sociales pueden emerger dinámicamente. Este enfoque resulta efectivo para agentes que interactúan en entornos donde no existen mecanismos de interacción acordados o claramente definidos, o bien, en entornos continuamente cambiantes.

- Formación de coaliciones desde el punto de vista de la Teoría de Juegos. Las aportaciones en esta línea presentan un análisis formal sobre la estabilidad de las coaliciones y el nivel de imparcialidad o justicia de las mismas.

La Teoría de Juegos no se centra en el estudio de los aspectos relacionados con el diseño de algoritmos, tales como protocolos y estrategias a seguir por los agentes para llegar a una configuración de coalición beneficiosa. En su lugar, el trabajo en Teoría de Juegos se centra en nociones de estabilidad de la formación como el kernel o el core. La Teoría de Juegos no proporciona algoritmos que los agentes puedan usar para formar coaliciones, sino que analiza aspectos como la estabilidad de una determinada configuración de coaliciones.

3. Necesidad de nuevas perspectivas

Una coalición puede definirse, según la formulación clásica, como un conjunto de agentes egoístas, que cooperan para la consecución de un objetivo común.

Así pues, la noción clásica de formación de coaliciones considera algoritmos para el establecimiento de equipos entre agentes cuyo objetivo es maximizar su propia recompensa individual, al mismo tiempo, que maximizan el pago grupal y garantizan la estabilidad de la formación.

El problema de la formación de coaliciones es un problema NP completo según Mas-Collel et al. (1995) que ha sido considerado en la mayoría de los trabajos como un problema estático y centralizado. Sin embargo, los dominios de aplicación de los MAS hacen que suposiciones o asunciones tradicionalmente consideradas para el estudio y propuesta de algoritmos en este ámbito dejen de ser válidas.

Las aplicaciones de los MAS son cada vez más complejas al desarrollarse en entornos dinámicos y abiertos. Las condiciones de dichos entornos evolucionan en el tiempo, constituyendo por tanto una fuente de incertidumbre que dificulta aún más la formación de grupos de agentes. En entornos dinámicos, factores como las restricciones del sistema, la disponibilidad de recursos o los objetivos de los agentes están en continuo cambio; cambios que llevan al MAS a distintas situaciones.

Se han propuesto diversos mecanismos que tratan de dar respuesta a la formación de coaliciones en entornos dinámicos, basándose para ello en las aptitudes y capacidad de los agentes para realizar una cierta tarea. En cualquier caso, estos enfoques no tienen en cuenta los objetivos y voluntad individuales de los agentes que pueden condicionar fuertemente el proceso, según la naturaleza de estos sea cooperativa o competitiva.

La consideración de la formación de coaliciones en MAS con agentes egoístas se centra en la formación de equipos para responder a las tareas y demandas surgidas en el sistema. En consecuencia, son enfoques orientados a tarea y en los que los grupos desaparecen con la compleción de la tarea o alcance del objetivo común. Esto da lugar a un proceso de formación de coaliciones continuo con el correspondiente gasto asociado en recursos de comunicación y computación que el proceso implica. Así pues, sería deseable que la formación de coaliciones no siempre estuviera orientada a tareas y permitiera la formación de equipos a medio y largo plazo según las circunstancias lo requirieran.

Otro aspecto que hasta los últimos años no está recibiendo atención hace referencia a la formación de coaliciones no disjuntas. Los algoritmos tradicionalmente propuestos para la formación de coaliciones alcanzan soluciones en las que cada agente pertenece a una única coalición dentro de la cual no existe (en general) jerarquía y en la que los agentes se coordinan entre sí, sin que exista coordinación con los equipos adyacentes. La coordinación entre distintos equipos así como la pertenencia de un agente a varias coaliciones simultáneamente puede resultar beneficiosa, e incluso natural, para ciertas aplicaciones.

4. Una revisión sobre distintos enfoques recientes

La formación de coaliciones constituye una forma de organización muy apropiada para los MAS, puesto que se ajusta adecuadamente a la estructura de un sistema en el que no existe una autoridad central. La formación de coaliciones eficientes constituye un gran desafío en el ámbito de los MAS. Para dar respuesta al mismo, es fundamental determinar cuál de las posibles coaliciones formar. Para ello, y desde un punto de vista formal y metodológico, es necesario calcular un valor asociado a cada posible coalición, que indique lo beneficiosa que esa coalición resultaría si se formara. El número de configuraciones de posibles coaliciones a formarse crece exponencialmente con el número de agentes en el sistema.

En los apartados siguientes se hace un recorrido sobre las distintas formas de aproximarse al problema de la formación de coaliciones en entornos multiagente, yendo desde un enfoque formal hasta las líneas más novedosas que pasan por la introducción de nociones de confianza entre los agentes o la consideración de las estructuras que ligan a los participantes entre sí, tal y como muestra la Figura 1.

4.1. Enfoque formal del proceso de formación de coaliciones

El proceso de formación de coaliciones puede considerarse dividido en tres grandes actividades que son el cálculo del valor asociado a cada coalición; generación de la estructura de coalición (Coalition Structure Generation, CSG) y, finalmente, distribución de pagos entre las coaliciones y agentes implicados en las mismas con el objetivo de que estas sean estables.

La formación de coaliciones puede ser estudiada desde muy distintos puntos de vista. Algunos de estos ya han quedado de manifiesto en la descripción anterior sobre las aproximaciones clásicas, sin embargo, la apertura a nuevas dimensiones derivadas de los recientes ámbitos de aplicación aparecidos para los MAS, abre aún más el abanico de posibilidades. Atendiendo a la caracterización formal del proceso de formación de coaliciones expuesto previamente, Talal (2008) presenta nuevos enfoques para la mejora de los mecanismos y algoritmos existentes con el objetivo de dar respuesta a los problemas anteriores. Así, propone un algoritmo para la evaluación de las posibles coaliciones del sistema que se aleja de las

tradicionales aproximaciones centralizadas. Este algoritmo permite el cálculo de estos valores de forma distribuida, repartiendo el trabajo de forma exhaustiva y disjunta sin que sea necesaria la comunicación entre los agentes y con un consumo de memoria mínimo.

Como respuesta al problema de CSG, Talal y Jennings (2008) proponen un algoritmo basado en programación dinámica que aventaja a los existentes hasta el momento, tanto en velocidad como en consumo de memoria.

No obstante, dentro del ámbito de los MAS, la mayoría de las aportaciones se han centrado, en lugar de en el desarrollo de nuevas estrategias más eficientes para la resolución de estos tres problemas, en la búsqueda de nuevos enfoques para el problema de formación de coaliciones considerado desde un punto de vista genérico. Los agentes, como entidades sociales que son, necesitan colaborar con otros agentes. Las especiales características de los dominios de aplicación de los MAS, favorece el desarrollo de nuevos análisis del problema, lo que a su vez da lugar a nuevas formulaciones del mismo y nuevos métodos para su resolución.

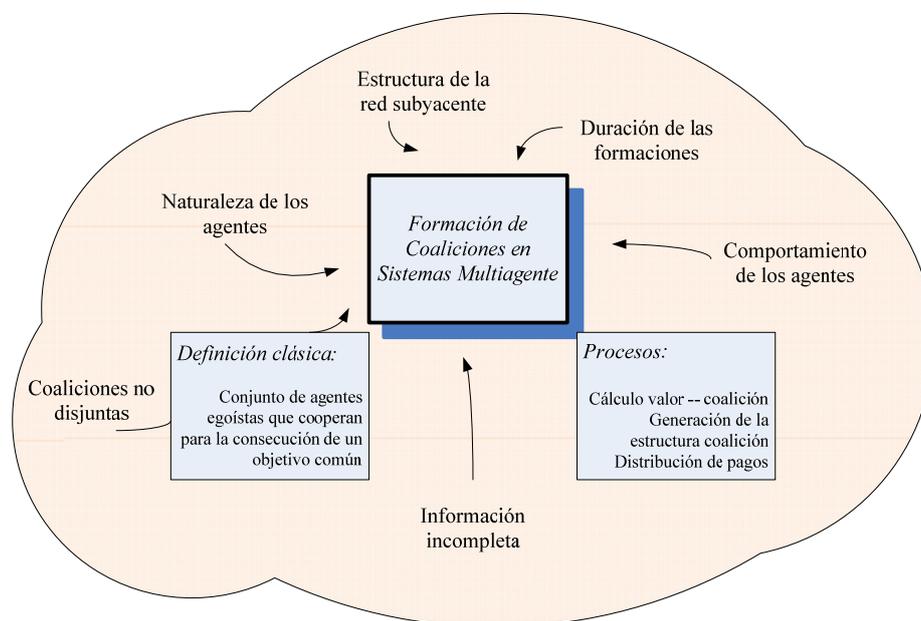


Figura 1. Esquema de presentación del ámbito de la formación de coaliciones en MAS

4.2. Aproximación a la formación de coaliciones en condiciones de información incompleta

Para dar respuesta a las dificultades que suponen el considerar procesos de formación de coaliciones en entornos de aplicación abiertos y dinámicos para MAS, Kraus et al. (2003) proponen un protocolo de acción que se enfrenta a la falta de información sobre sus compañeros y su entorno en la toma de decisiones para la formación de equipos.

Kraus et al. (2003) propusieron un protocolo para formación de coaliciones basado en una idea básica para formación de equipos, los procesos de negociación en dominios RFP (Request for Proposals). Un entorno para el que resulta claramente adecuado el mecanismo propuesto es el Business to Business (B2B), donde varios contratistas tratan de unirse para dar respuesta a peticiones complejas compuestas de varias subtareas. En estos entornos, el factor tiempo es muy importante, ya que sólo se puede responder a la demanda en un cierto período. De igual modo, también existe incertidumbre en cuanto a la información de la que los agentes disponen, puesto que aunque cada subtarea o demanda tenga asociado un precio, el valor de esta y el coste incurrido por cada contratista son desconocidos para el resto de agentes.

Las características de la situación descrita hacen que los mecanismos de formación de coaliciones tradicionales no resulten adecuados. El mecanismo para formación de coaliciones aquí propuesto proporciona las estrategias que los agentes deben seguir para la formación de coaliciones bajo dicho protocolo. Según este, los agentes negocian y eligen a sus compañeros de grupo siguiendo dos posibles heurísticas. Al contrario que en las aproximaciones clásicas, no se asume información completa. Se considera que los agentes evalúan las tareas de igual forma y que el valor que estas tareas tienen para otros agentes no puede conocerse, aunque sí estimarse en cierta medida. La formación de coaliciones se considera como un proceso económico, estando limitado en tiempo y decreciendo el valor de las tareas a acometer a medida que este pasa.

4.3. Consideración del comportamiento histórico de los agentes para determinar la duración de la coalición

Como en el caso anterior, Bai y Zhang (2008) proponen un mecanismo para la formación de coaliciones que se aleja de los enfoques tradicionales, al permitir a los agentes elegir de forma flexible la duración temporal de sus equipos y los objetivos a perseguir. Las reglas para los procesos de toma de decisión se basan en la evaluación de distintos aspectos del sistema mediante lógica difusa. La elevada incertidumbre de la mayoría de los entornos abiertos hace que el análisis y la evaluación de los factores dinámicos tales como la funcionalidad histórica de los agentes, los requerimientos de las tareas o las restricciones de recursos, no sea fácil.

Este mecanismo permite formas de colaboración entre agentes más dinámicas y reduce los consumos de recursos derivados de la continua formación/reformación de grupos para adaptarse a las cambiantes circunstancias y demandas. Tanto la formación de equipos a largo, como a corto plazo, tienen ventajas e inconvenientes. La formación de equipos a largo plazo resulta apropiada para situaciones estables, sin embargo, para entornos muy dinámicos, con requerimientos o tareas muy distintas entre sí, las formaciones más a corto plazo resultan más adecuadas. Bai y Zhang (2008) desarrollan un mecanismo que permite a los jefes de cada coalición elegir la duración de sus relaciones de colaboración con los miembros de su equipo según las cambiantes necesidades de las tareas y funcionalidad de los agentes.

4.4. Influencia de la estructura de red subyacente al MAS en la formación de equipos

Otra línea de estudio para el desarrollo de la formación de coaliciones fue introducida por Gaston y desJardins (2005) al tener en consideración la estructura de la red subyacente al MAS para la formación de coaliciones descentralizadas. Su trabajo mostró que la topología de la red tiene un efecto significativo en la calidad de las coaliciones formadas y su funcionalidad, y también que es posible desarrollar agentes que inteligentemente adaptan la estructura de la red para incrementar la habilidad de la organización para formar coaliciones de buena calidad.

El objetivo de esta nueva aproximación era disminuir el elevado coste computacional implicado por otros algoritmos y facilitar la estabilidad de la coalición al permitir que sólo agentes conectados al iniciador de grupo sean candidatos a formar parte de los mismos. En este caso, las tareas se consideran globalmente conocidas por todo el MAS y los modelos de evaluación sobre la formación de coaliciones son muy sencillos.

Basados en las aplicaciones de monitorización y vigilancia en distintos tipos de entorno para redes de sensores heterogéneos, Grinton et al. (2008) proponen nuevos modelos para formación dinámica de coaliciones entre agentes no egoístas. El valor de la coalición deja de considerarse una función lineal de las capacidades de los miembros de la coalición y se proponen dos nuevas políticas de adaptación de red que permiten limitar el grado de conectividad máximo de los nodos manteniendo los niveles de funcionalidad del enfoque propuesto por Gaston y desJardins (2005).

La misma filosofía, pero en otra forma, es aplicada por Barton y Allan (2007). La formación de coaliciones en redes sociales puede verse como un grafo de agentes interdependientes que permite diversas opciones en el momento de decidir qué tarea realizar y con qué agentes formar equipo. Basados en esta idea, Barton y Allan (2007) propone la formación de coaliciones en MAS en la que los equipos deben formar un componente conexo de la red social. Los equipos se forman entre agentes que están conectados entre sí. Estos agentes usan distintas estrategias para elegir las tareas a acometer y los compañeros de equipos. De igual modo, los agentes pueden abandonar coaliciones incompletas, reduciéndose, de este modo, la formación de coaliciones a un proceso de negociación entre parejas de agentes que da lugar a la formación de equipos de forma incremental. En este proceso y durante la toma de decisiones, se produce el descubrimiento y la adaptación de estructuras de red más efectivas. El trabajo desarrollado se basa en el concepto de red de agentes organizada (Agent Organized Network, AON). Siendo una AON un modo de representación de los MAS en la que los nodos representan agentes y los arcos restricciones en las relaciones entre los agentes (distancia, limitación en las comunicaciones, etc.)

4.5. Nociones de confianza y motivación para la formación de coaliciones

Cuando los agentes son egoístas, debe haber mecanismos apropiados para manejar la incertidumbre que de la propia naturaleza de los mismos surge. Al formar una coalición, los agentes deben gestionar el riesgo asociado de interactuar con otros agentes con distintos objetivos que pueden faltar a la compleción de sus compromisos.

Griffiths et al. (2003) introducen el concepto de clan, basado en la motivación y la confianza de los agentes. Desde esta perspectiva, la motivación se considera como un medio para representar y razonar sobre los objetivos generales de los agentes. La confianza representa un mecanismo para modelar y razonar sobre la confiabilidad y la honestidad, entre otros aspectos, de los agentes. Se puede definir el clan entonces como un grupo de agentes que confían entre sí y con objetivos similares.

Los miembros del clan se favorecen en la toma de decisiones privadas sobre cooperación, con el objetivo de aumentar el beneficio mutuo. El modelo aquí propuesto permite la formación de coaliciones a medio plazo. Al formarse una unión entre agentes no únicamente basada en la compleción de una tarea concreta o en unos objetivos comunes, sino con una perspectiva más amplia sobre los compañeros de equipo.

4.6. Formación de coaliciones no disjuntas

La mayoría de la investigación en formación de coaliciones ha asumido la formación de coaliciones disjuntas en las que los agentes no pueden pertenecer a más de una coalición. La noción de coaliciones superpuestas fue introducida por Shehory et al. (1998) que desarrollaron un algoritmo voraz para encontrar una solución al problema. Dang et al. (2006) han vuelto a considerar la posibilidad de desarrollar coaliciones no disjuntas para aplicaciones derivadas del ámbito de las redes de sensores.

La monitorización y vigilancia de grandes áreas por medio de una red de sensores requiere la colaboración de estos sensores/agentes entre sí para la recogida eficiente de información de una determinada área de interés. Este problema puede modelarse de forma natural como un problema de formación de coaliciones en el que varios agentes se reúnen para seguir a un determinado objetivo. Estos grupos de agentes combinan sus recursos para el beneficio del equipo y se separan cuando el objetivo que motivó su unión desaparece, o bien cuando un objetivo de mayor importancia surge. Dos algoritmos capaces de resolver este problema, uno de ellos de forma óptima, y otro capaz de dar una solución dentro de unos límites de optimalidad fueron desarrollados por Dang et al (2006).

5. Conclusión y líneas de trabajo futuras

- La formación de coaliciones constituye un problema que aparece en muy diversos ámbitos de investigación relacionado con distintas circunstancias. Esto mismo propicia, por un lado, su amplitud de miras a la hora de enfrentar los problemas que le incumben, y por otro lado, la aparición de muy diversas contribuciones difícilmente generalizables.
- Tal y como se ha mostrado en puntos anteriores, los distintos algoritmos presentados consideran, o bien circunstancias de operación concretas o entidades de ciertas características, o estudian un planteamiento genérico bajo diversas asunciones. Así pues, resulta complejo establecer un cierto orden en la situación actual del estudio de la formación de coaliciones, concretamente, en cuanto al ámbito de los MAS se refiere.
- Siguiendo la última línea de investigación introducida en el apartado previo, el trabajo siguiente tratará la formación de coaliciones no disjuntas en MAS para unas circunstancias muy concretas.
- El escenario en estudio está constituido por una red de sensores inalámbricos encargada de la monitorización de un área más o menos extensa (tareas de vigilancia militar, monitorización medioambiental, etc.). Las especiales características de estos entornos de aplicación favorecen la formación de agrupaciones entre los sensores con el fin primordial de ahorrar energía en sus tareas de sensado.
- Puesto que las tareas de sensado no son, en principio, delegables, el criterio empleado para la formación de grupos se basa en la similitud de las medidas recogidas por los distintos nodos. En estas condiciones, el desarrollo de un protocolo de formación de agrupaciones basado en lógica difusa supone una nueva vía para la organización del sistema, pues este principio favorece el hecho de que un nodo pertenezca en distinta medida a varios grupos. En estas circunstancias se pretende estudiar la capacidad de estructuración del sistema, así como de reorganización frente a los cambios en el entorno. Una vez establecidos los grupos de agentes, estos pueden repartirse las tareas a realizar, teniendo en cuenta el grado de pertenencia de cada uno de sus componentes, puesto que la participación y empleo de recursos para dicha tarea vendrá determinado por dicho grado de pertenencia difuso. No obstante, este es un problema posterior y que aparece como extensión inmediata para trabajos futuros.
- Así pues, queda patente la necesidad no sólo de establecer un cierto orden en las líneas de investigación y actuación en cuanto a formación de coaliciones en MAS se refiere, sino también la consideración de nuevas vías como la aquí propuesta que puedan responder, en mayor o menor medida, a los requisitos planteados por las nuevas aplicaciones de monitorización de los MAS.

Referencias

- Bai, Q.; Zhang, M. (2008). A Fuzzy Logic-Based Approach for Flexible Self-Interested Agent Team Forming. *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 89, pp. 101-113.
- Barton, L.; Allan, V. H. (2007). Methods for Coalition Formation in Adaptation-Based Social Networks. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 4676, pp. 285-297.
- Dang, V.D.; Dash, R.K.; Rogers, A.; Jennings, N.R. (2006). Overlapping Coalition Formation for Efficient Data Fusion in Multi-Sensor Networks. *Proceedings of the Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'06)*. Boston, Estados Unidos.
- Gasser, L. (1993). Social Knowledge and social action. *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'93)*. Chambéry, Francia
- Gaston, M.E.; desJardins, M. (2005). Agent-organized networks for dynamic team formation. *Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems (AAAMAS'05)*. Nueva York, Estados Unidos.
- Glinton, R.; Scerri, P.; Sycara, K. (2008) Agent-Based Sensor Coalition Formation. *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion (FUSION 2008)*. Colonia, Alemania.
- Griffiths, N.; Luck, M. (2003). Coalition Formation through Motivation and Trust. *Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems (AAAMAS'03)*. Melbourne, Australia.
- Kraus, S.; Shehory, O.; Taase, G. (2003). Coalition Formation with Uncertain Heterogeneous Information. *Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems (AAAMAS'03)*. Melbourne, Australia.
- Mas-Colell, A.; Whinston, M.; Green J. R. (1995) *Microeconomic Theory*. Oxford University Press.
- Rahwan, T. (2007) *Algorithms for Coalition Formation in Multi-Agent Systems*. Ph.D Thesis
- Rahwan, T.; Jennings, N.R. (2008). An Improved Dynamic Programming Algorithm for Coalition Structure Generation. *Proceedings of the 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAAMAS'08)*. Estoril, Portugal.
- Smith, R. (1980). The Contract Net Protocol: High Level Communication and Control in a Distributed Problems Solver. *IEEE Transaction on Computers*, Vol. 29, No. 12, pp. 1104-1113.
- Vig, L.; Adams, J.A. (2007). Coalition Formation: From Software Agents to Robots. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Practice*, Vol.50, No. 1, pp. 85-118.