

Capítulo 10

10. Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento

10.1 Síntese do Trabalho Desenvolvido

O objectivo geral deste trabalho foi o estudo e desenvolvimento de metodologias de coordenação em sistemas multi-agente e sua aplicação em equipas de agentes que realizam tarefas complexas em ambientes dinâmicos, inacessíveis e não determinísticos. Neste contexto, foram:

- Estudados os conceitos de Agente Autónomo e Sistema Multi-Agente e as diversas metodologias propostas pelos investigadores da área para realizar a coordenação de agentes;
- Analisados domínios de aplicação adequados à aplicação de metodologias de coordenação de agentes, nomeadamente: problemas de escalonamento na gestão universitária e à liga de simulação do RoboCup;
- Estudadas as abordagens de outros investigadores da área aos domínios estudados com ênfase nas metodologias de coordenação aplicadas a estes domínios;
- Definida uma linguagem – *SCHEDULING UNILANG* – que permite a coordenação de agentes por conhecimento *a priori* no domínio da resolução de problemas de escalonamento na gestão universitária;
- Projectado e implementado um sistema de resolução de problemas de gestão universitária: *UNIPS – University Planning and Scheduling System*.
- Proposta a coordenação estratégica como metodologia de coordenação para a execução de tarefas cooperativas através de equipas de agentes com mobilidade espacial;
- Propostas diversas metodologias de coordenação para equipas de agentes com mobilidade espacial, tais como o SBSP – Posicionamento Estratégico Baseado

em Situações e o DPRE – Troca Dinâmica de Posicionamentos e Papéis;

- Propostas diversas metodologias de coordenação, incluindo a Comunicação Avançada, Percepção Inteligente, Modelização Mútua e Controlo Parcialmente Hierárquico;
- Definida uma linguagem – *COACH UNILANG* que permite a um agente treinador utilizar a Coordenação por Controlo Parcialmente Hierárquico;
- Projectado e Implementado um Sistema Multi-Agente totalmente funcional – FC Portugal – que inclui a implementação de todas as metodologias de coordenação propostas;
- Validação das metodologias desenvolvidas em competições oficiais de futebol robótico e experiências controladas (em comparação directa com as metodologias de outros investigadores), comprovando o aumento do desempenho fornecido pela utilização de cada metodologia de coordenação.

10.2 Principais Resultados e Conclusões

A análise do domínio da Gestão Universitária revelou a complexidade da procura de soluções para o problema da geração de horários e os problemas que lhe estão associados (distribuição de serviço docente, calendarização de exames e alocação de salas). Foi concluído que as metodologias de resolução e os sistemas comerciais de geração de horários não permitem resolver problemas de escalonamento da gestão universitária de forma integrada, efectuando a ligação entre as diversas fases de resolução do mesmo. Com base nesta conclusão, foi definida uma linguagem – *SCHEDULING UNILANG* – que permite representar os problemas de escalonamento universitário de forma integrada e permite a sua resolução através de um conjunto de agentes autónomos. O domínio da gestão universitária foi utilizado nesta dissertação de forma bastante simplificada uma vez que as metodologias de coordenação desenvolvidas implicam na sua maioria a movimentação espacial de agentes.

Partindo do estudo efectuado, foram desenvolvidas formalizações para os principais problemas de escalonamento universitário e foi definida uma linguagem – *SCHEDULING UNILANG* – que permite efectuar a coordenação por conhecimento *a priori*, representando qualquer problema de escalonamento na gestão universitária. Através da utilização desta linguagem é possível coordenar um conjunto de agentes escalonadores e agentes que representam as diversas entidades presentes no processo (docente, turmas e salas) de forma a resolver os problemas de escalonamento referidos.

Do estudo realizado relativamente a possíveis domínios de aplicação, foi concluído que o RoboCup e em particular a liga de simulação constituíam o domínio ideal para a aplicação das metodologias de coordenação desenvolvidas. A liga de simulação inclui

complexidades encontradas nos sistemas robóticos (tais como erros na percepção e acção) mas ao mesmo tempo utiliza um cenário muito realista do ponto de vista da tarefa cooperativa a executar pelas equipas de agentes. As características da simulação, tornam este cenário particularmente adequado às metodologias de coordenação desenvolvidas:

- O facto de ser uma simulação em tempo-real em que os agentes dispõem de diversas fontes de informação sensorial, sensores configuráveis e comunicação pouco fiável e com baixa largura de banda, torna o domínio adequado à aplicação da comunicação avançada, percepção inteligente e modelização mútua;
- O ambiente multi-objectivo, parcialmente cooperativo e parcialmente adverso com um vasto conjunto de acções de baixo-nível disponíveis e em que os agentes são heterogéneos, têm a necessidade de criar acções colectivas complexas e enfrentar um oponente com uma estratégia desconhecida à partida, torna este ambiente particularmente atractivo para a coordenação estratégica.
- A complexidade da tarefa a desempenhar pela equipa de agentes autónomos associada à disponibilidade de um agente privilegiado, hierarquicamente superior aos restantes e com uma visão global do mundo, torna este domínio particularmente adequado à coordenação por controlo parcialmente hierárquico.

Do estudo relativo às metodologias de coordenação, negociação e cooperação entre agentes resultou a definição de algumas novas metodologias de alto-nível de coordenação de agentes sendo a principal proposta a coordenação estratégica (incluindo análise situacional, posicionamento estratégico baseado em situações, utilizando formações dinâmicas, definição e trocas de papéis e posicionamentos de agentes). Outras metodologias de coordenação propostas incluíram a comunicação avançada, modelização mútua, percepção inteligente e controlo parcialmente hierárquico.

As estratégias de coordenação propostas foram aplicadas a domínios distribuídos e descentralizados em que múltiplos agentes executam uma tarefa cooperativa complexa. As metodologias de coordenação são, no entanto, generalizáveis de forma a serem aplicadas a outros domínios socialmente mais úteis.

Através de resultados experimentais no domínio do futebol robótico, obtidos em competições oficiais e experiências controladas, foi comprovado que a coordenação estratégica proposta no âmbito desta tese, permite realizar uma coordenação de alto-nível muito eficaz na realização de tarefas complexas, incrementando significativamente o desempenho de uma equipa de agentes. Foi também comprovada a eficácia das outras metodologias de coordenação propostas.

O principal resultado a referir é provavelmente que as metodologias de coordenação desenvolvidas no âmbito desta tese conduziram a excelentes resultados na competição RoboCup. A equipa FC Portugal, desenvolvida no âmbito desta tese, venceu um campeonato do mundo e dois campeonatos da Europa da liga de simulação de futebol

robótico, marcando um total de 387 golos e sofrendo unicamente 9 nas competições realizadas em 2000 e 2001. Nestas competições, a equipa confrontou por 39 vezes, as suas metodologias de coordenação com as metodologias desenvolvidas por algumas das melhores universidades mundiais de 12 países, incluindo a Alemanha, Japão, E.U.A., Inglaterra, Holanda, China, Rússia e Austrália.

10.3 Originalidades

A principal proposta desta dissertação, a coordenação estratégica, constitui a sua principal originalidade. De facto, a utilização da coordenação estratégica, associada à coordenação espacial por posicionamento estratégico e à coordenação por definição e troca de papéis, permite obter uma enorme flexibilidade na execução de tarefas cooperativas complexas por equipas de agentes, em ambientes dinâmicos e inacessíveis.

Os resultados obtidos em experiências controladas, demonstram claramente que a coordenação estratégica é a grande responsável pela capacidade da equipa FC Portugal e consequentemente demonstram também que esta metodologia é a principal responsável pelos resultados obtidos pela FC Portugal em competições oficiais de futebol robótico. Os campeões do mundo em anteriores competições (CMUnited - 1999) e seguintes (Tsinghuaeolus - 2001) utilizaram muito boas capacidades individuais de baixo-nível (drible, intercepção) e uma estratégia única bem afinada para toda a competição, sendo estas as suas principais forças. Pelo contrário, a equipa FC Portugal utilizou as metodologias de coordenação descritas nesta tese sendo capaz de alterar a sua estratégia de jogo de forma drástica, de acordo com o curso de cada jogo com evidentes resultados competitivos.

Outras originalidades da tese incluem:

- Os mecanismos associados à coordenação estratégica, nomeadamente o SBSP – Posicionamento Estratégico Baseado em Situações e DPRE – Troca Dinâmica de Posicionamentos e Papéis. O SBSP após a sua publicação e divulgação de parte do código tornou-se no mecanismo de posicionamento mais utilizado pelas equipas de futebol robótico simulado. No campeonato do mundo de 2001, 6 dos 8 finalistas utilizaram este mecanismo de posicionamento;
- As linguagens definidas para representação de problemas de escalonamento na gestão universitária – SCHEDULING UNILANG – e representação de estratégias no domínio do futebol robótico – COACH UNILANG. A originalidade inclui não só a sintaxe e semântica das linguagens mas também a sua utilização como forma a permitir a um conjunto de agentes se coordenarem por conhecimento *a priori* e executarem uma tarefa cooperativa complexa;
- Os mecanismos de coordenação por comunicação avançada, modelização mútua

e percepção inteligente. A sua utilização individual e sobretudo a sua utilização combinada, permitem aumentar consideravelmente o desempenho de uma equipa de agentes na execução de uma tarefa cooperativa complexa.

10.4 Limitações

As principais limitações do trabalho prendem-se com a utilização de um único domínio para validar as metodologias de coordenação propostas. De facto, as principais propostas deste trabalho (coordenação estratégica, SBSP, DPRE, SLM, ADVCOM, modelização mútua e coordenação por controlo parcialmente hierárquico) foram aplicadas exclusivamente no domínio do futebol robótico simulado. Este facto conduz facilmente à crítica que as metodologias de coordenação não são genéricas e sim dependentes do domínio. No entanto, tal conclusão não é, em nossa opinião, verdadeira.

A definição de metodologias de coordenação eficazes implica sempre um dado tipo de domínio e um determinado tipo de tarefa cooperativa. Evidentemente que a coordenação estratégica, nomeadamente no que diz respeito ao posicionamento estratégico baseado em situações e troca dinâmica de posicionamentos, só é aplicável em domínios em que equipas de agentes com mobilidade espacial realizam tarefas cooperativas complexas, que implicam a necessidade de formações dinâmicas e comportamentos distintos, dependendo da situação. No entanto, domínios com estas características incluem não só o futebol robótico simulado, como também, entre outros: as outras ligas do futebol robótico, o RoboCup Rescue, cenários de combate a incêndios florestais e limpeza de minas e todos os cenários de guerra ou batalha.

10.5 Perspectivas de Desenvolvimento

Dada a natureza do trabalho realizado no âmbito desta dissertação, as perspectivas de desenvolvimento que se apresentam são diversas. Relativamente ao sistema UNIPS e metodologias de coordenação desenvolvidas no âmbito da gestão universitária, as perspectivas de desenvolvimento incluem:

- Extensão do sistema UNIPS com capacidades para efectuar a marcação automática de reuniões, novos algoritmos de geração de horários e resolução dos problemas associados;
- Realização de um conjunto mais alargado de experiências utilizando o Sistema UNIPS em modo multi-agente e comparação dos resultados obtidos com os resultados obtidos através da resolução manual e assistida e utilizando o modo centralizado;
- Criação de um repositório de problemas de escalonamento universitário, tendo

como base a linguagem *SCHEDULING UNILANG*;

- Definição de uma competição internacional de geração de horários (e resolução de problemas associados) tendo como base problemas definidos em *SCHEDULING UNILANG*;
- Desenvolvimento do sistema UNIPS de forma a ser aplicado numa universidade portuguesa.

No âmbito do desenvolvimento de metodologias de coordenação no domínio do futebol robótico simulado, apresentam-se como principais perspectivas de desenvolvimento:

- Extensão da formalização da estratégia de equipa com a inclusão de planos flexíveis e respectivas condições de activação e término. A representação dos planos flexíveis deverá ser realizada definindo os diversos passos do plano, agentes participantes, suas acções preferenciais e formação utilizada em cada passo.
- Extensão das metodologias de coordenação espacial definidas para domínios tri-dimensionais (como por exemplo o combate aéreo);
- Realização de experiências com os protocolos de definição e troca dinâmica de papéis e posicionamentos para agentes heterogéneos com inclusão de importâncias de posicionamentos definidos;
- Discussão dos conceitos, sintaxe e semântica da linguagem COACH UNILANG com especialistas do domínio do futebol (treinadores profissionais, jornalistas e jogadores). Esta discussão deverá permitir refinar a linguagem, utilizando conceitos utilizados pela comunidade de futebol real;
- Extensão das metodologias de modelização mútua através da criação de modelos da equipa adversária através da observação do seu comportamento ao longo do tempo. Utilizando o agente treinador para detectar a dinâmica das formações da equipa adversária utilizando metodologias como: *ILP – Inductive Logic Programming*, Árvores de Decisão, Regras de Associação e/ou Redes Neurais.
- Extensão dos conceitos do *Optimization Kick* para outros comportamentos de baixo nível como o drible ou a intercepção. Utilização de outras metodologias de resolução de problemas de optimização como o arrefecimento simulado e os algoritmos genéticos na resolução destes problemas, e comparação dos resultados com os obtidos através do *Optimization Kick*.
- Aplicação de técnicas de aprendizagem no contexto do futebol robótico simulado (desde as acções de baixo-nível: drible, chuto e intercepção, até à camada estratégica: definição e adaptação da táctica em cada jogo);
- Estudo de generalização das metodologias de coordenação desenvolvidas através da sua aplicação a outros domínios, nomeadamente as outras ligas do RoboCup

(robôs pequenos, robôs médios, robôs com pernas e RoboCup Rescue);

- Construção de um agente capaz de receber a análise de alto nível de um jogo de futebol simulado (fornecida pelo treinador adjunto) e gerar um comentário inteligente em tempo-real, utilizando linguagem natural e síntese de voz. Interligação deste agente com o visualizador tridimensional desenvolvido, construindo um sistema integrado de visualização, análise e comentário.

Refira-se que se encontram actualmente em curso projectos de investigação, resultantes desta dissertação e nos quais o autor se encontra envolvido no LIACC, conducentes à realização de grande parte destas perspectivas de desenvolvimento. Destes projectos destaca-se o projecto *Portus – A Common Framework for Cooperative Mobile Robotics*, *FC Portugal – New Coordination Methodologies applied to the Simulation League* e *LEMAS – Learning in Multi-Agent Systems in the Sony Legged League*. A realização do campeonato do mundo de futebol robótico – RoboCup 2004 – em Lisboa (em Junho de 2004) permitirá efectuar a avaliação destes projectos utilizando como domínio de teste as diversas ligas do futebol robótico.