



Coordenação em Sistemas Multi-Agente

Luís Paulo Reis

lpreis@fe.up.pt, Tel: 919455251, 225081829
Investigador do LIACC – Laboratório de Inteligência Artificial e
Ciência de Computadores - Univ. Porto
Docente da FEUP – Faculdade de Engenharia da Univ. Porto
Membro do Comité Técnico da Federação RoboCup

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 1



Estrutura da Apresentação

- Agentes e Sistemas Multi-Agente
- Introdução à Coordenação em SMA
- Coordenação de Agentes Cooperativos
- Conclusões

Luis Paulo Reis

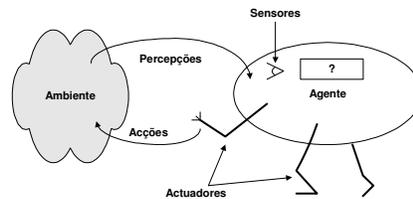
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 2



Definição de Agente

“Um Agente é um sistema computacional, situado num dado ambiente, que tem a percepção desse ambiente através de sensores, tem capacidade de decisão, age de forma autónoma nesse ambiente através de actuadores, e possui capacidades de comunicação de alto-nível com outros agentes e/ou humanos, de forma a desempenhar uma dada função para a qual foi projectado.” [Reis, 2002]



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 3



Definição de Agente

Peça de Hardware ou Sistema Computacional com as propriedades seguintes:

- Autonomia
- Pro-Actividade
- Reactividade
- Habilidade Social

Luis Paulo Reis

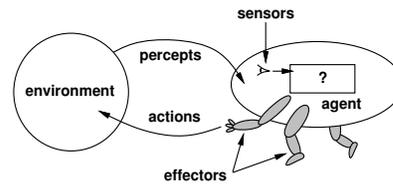
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 4



Agentes Inteligentes

- Agente:
 - Apercebe-se do ambiente através de sensores e age através de actuadores
 - Sensores:
 - Olhos, ouvidos, nariz, tacto, gosto
 - Actuadores:
 - Pernas, braços, mãos
- Agente Robótico:
 - Sensores:
 - Camaras, sonares, infra-vermelhos
 - Actuadores:
 - Motores, rodas



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 5



Agentes vs Objectos

- Agentes decidem o que fazer!
- Métodos dos Objectos são chamados externamente!
- Agentes reagem aos sensores e controlam actuadores!

“Objects do it for free; agents do it for money”

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 6



Propriedades dos Ambientes

- **Acessível vs Inacessível**
 - Acessível se os sensores detectam tudo o que é relevante no ambiente!
- **Determinístico vs Não Determinístico**
 - Determinístico se as acções do agente determinam o próximo estado!
- **Estático vs Dinâmico**
 - Dinâmico se muda enquanto o agente está a pensar!
- **Discreto vs Contínuo**
 - Discreto se existe um número finito de percepções e acções!



Luis Paulo Reis

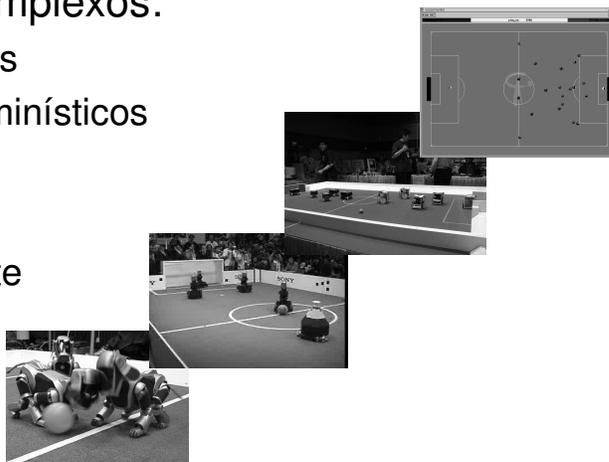
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 7



Os Ambientes do RoboCup

- **Os mais Complexos:**
 - Inacessíveis
 - Não Determinísticos
 - Dinâmicos
 - Contínuos
 - Multi-Agente



Luis Paulo Reis

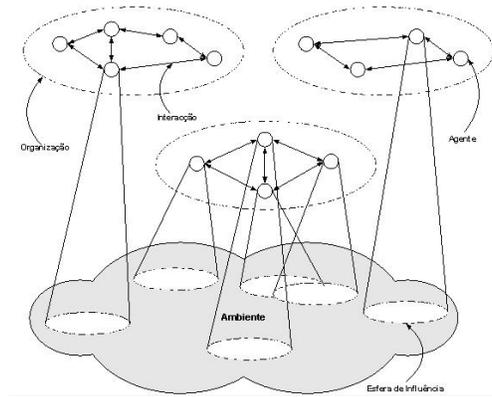
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 8



Sistemas Multi-Agente (SMA)

- “Sistema em que dois ou mais agentes interagem ou trabalham em conjunto de forma a desempenhar um determinado conjunto de tarefas”



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 9



Motivação para os SMA

- Dimensão do problema elevada
- Problemas geográfica e/ou funcionalmente distribuídos
- Conhecimentos ou informações distribuídos
- Interface cooperativa homem-máquina natural
- Clareza e simplicidade conceptual de projecto
- Paralelismo (execução mais rápida)
- Robustez (não existe um ponto único de falha no sistema)
- Escalabilidade (aumento dos agentes, sistema aberto)
- Divisão do problema em vários subproblemas
- Manutenção da privacidade da informação e conhecimentos individuais

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 10



Desafios nos SMA

- **Comunicação em SMA:**
 - O quê, quando, a quem e como comunicar?
 - Protocolos de comunicação e linguagens standard
- **Aprendizagem em SMA**
- **Coordenação em SMA:**
 - Agentes Competitivos: Negociação, Resolução de conflitos
 - Agentes Cooperativos: Cooperação, Formação de equipas

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 11



Estrutura da Apresentação

- Agentes e Sistemas Multi-Agente
- Introdução à Coordenação em SMA
- Coordenação de Agentes Cooperativos
- Conclusões

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 12



Coordenação em SMA

- Definição de Coordenação:
 - “Acto de trabalhar em conjunto de forma harmoniosa no sentido de atingir um acordo ou objectivo comum” [Reis, 2002]
- Distinção entre SMA Cooperativos e SMA Competitivos

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 13



Razões para a Coordenação

- Dependências nas acções dos agentes
- Necessidade que o SMA respeite restrições globais
- Nenhum agente individualmente tem recursos, informação ou capacidade suficiente para executar a tarefa ou resolver o problema completo
- Eficiência:
 - Através da troca de informação ou divisão de tarefas
- Prevenir a anarquia e o caos:
 - Visão parcial, falta de autoridade, conflitos, interacções entre agentes

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 14



Coordenação em SMA

- Definição de Coordenação:
 - “o acto de trabalhar em grupo de forma harmoniosa” [Malone et al., 1990]
- Definição de Equipa:
 - “Conjunto distinguível de 2 ou mais indivíduos que interagem de forma dinâmica, interdependente e adaptativa de forma a atingirem objectivos comuns, partilhados e especificados” [Bower et al].

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 15



Coordenação em SMA

- Definições de Coordenação:
 - “Ajustamento ou interacção harmoniosa” [AHD, 2000]
 - “O acto de trabalhar em grupo de forma harmoniosa” [Malone et al., 1990]
 - “Processo pelo qual um agente raciocina acerca das suas acções locais e das acções (antecipadas) dos outros para tentar assegurar que a comunidade actue de maneira coerente” [Jennings, 1996]
 - “Processo de gestão das interdependências entre actividades” [Malone e Crowston, 1994]

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 16



Coordenação em SMA

- Definições de Coordenação:
 - “A operação de sistemas complexos compostos de componentes” [NSF-IRIS, 1989]
 - “O esforço conjunto de actores independentes no sentido de atingirem objectivos mutuamente definidos” [NSF-IRIS, 1989]
 - “A integração e ajustamento harmonioso dos esforços individuais no sentido de alcançar um objectivo mais amplo” [Singh, 1992]
 - “O acto de trabalhar em conjunto” [Malone e Crowston, 1991]

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 17



Coordenação em SMA

- Uma Definição Final:
 - *“O acto de trabalhar em conjunto de forma harmoniosa no sentido de atingir um acordo ou objectivo comum”*
[Reis, 2002]

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 18



Coordenação: Necessidade

▪ Relações de Dependência entre Agentes:

- **Independência.** Não existe qualquer tipo de dependência entre os agentes;
- **Unilateral.** Um agente depende do outro mas a relação inversa não se verifica;
- **Mútua.** Ambos os agentes dependem do outro para atingirem os seus próprios objectivos;
- **Dependência recíproca.** Um agente depende do outro para um dado objectivo e o outro agente depende do primeiro para um outro objectivo (não necessariamente o mesmo).

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 19



Dependências e Processos de Coordenação

<i>Dependência</i>	<i>Processos de Coordenação para Gerir a Dependência</i>
<i>Recursos Partilhados</i>	<i>“First come/First serve”, Ordenação por Prioridades, Orçamentos, Decisão da Gestão, Negociação e Ofertas</i>
<i>Alocação de Tarefas</i>	<i>“First come/First serve”, Ordenação por Prioridades, Orçamentos, Decisão da Gestão, Negociação e Ofertas</i>
<i>Relações Produtor/Consumidor</i>	<i>Notificação, Sequenciamento, Seguimento, Gestão de Stocks, Just in Time, Quantidade Económica de Encomenda, Normalização, Projecto Participatório, Interação com os Utilizadores</i>
<i>Restrições de Pré-Requisitos</i>	<i>Notificação, Sequenciamento, Seguimento</i>
<i>Transferência</i>	<i>Gestão de Stocks, Just in Time, Quantidade Económica de Encomenda</i>
<i>Usabilidade</i>	<i>Normalização, Projecto Participatório, Interação com os Utilizadores</i>
<i>Projecto para produção</i>	<i>Engenharia Concorrente</i>
<i>Restrições de Simultaneidade</i>	<i>Escalonamento, Sincronização</i>
<i>Tarefas e Sub-Tarefas</i>	<i>Seleção de Objectivos, Decomposição de Tarefas</i>

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 20



Necessidade de Coordenação

- **Existem dependências nas acções dos agentes.** Acções necessárias para atingir os objectivos dos agentes individuais estão relacionadas (decisões locais têm impacto nas decisões de outros agentes ou interacções destrutivas entre agentes)
- **Existe a necessidade que o SMA respeite restrições globais.** (a nível de custos, tempo, recursos, etc). Se os agentes agissem individualmente não conseguiriam respeitar estas restrições. Precisam de coordenar as suas actividades
- **Nenhum agente individualmente tem recursos, informação ou capacidade suficiente para executar a tarefa ou resolver o problema completo.**
 - Problemas necessitam de conhecimentos distintos para resolução (diferentes agentes)
 - Conhecimentos têm de ser combinados de forma a produzir o resultado desejado.
 - Agentes têm recursos distintos (capacidade de processamento, memória, etc.) que têm de ser utilizados de forma coordenada para resolver o problema.
 - Agentes podem também possuir informação distinta, (sensores distintos ou estarem geograficamente em locais distintos)
 - Capacidades de posicionamento diferentes, podendo posicionar-se em zonas distintas. (suas capacidades de percepção e acção sobre o meio serão distintas)

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 21



Mais Razões para a Coordenação

- **Eficiência.** Através da troca de informação ou divisão de tarefas:
 - Troca de tarefas se ambos forem capazes de executar de forma mais eficiente a nova tarefa
 - Agente enviar informação ou permitir a utilização dos seus recursos computacionais de forma a aumentar a eficiência de uma tarefa executada por outro agente;
- **Prevenir a anarquia e o caos.** Devido à descentralização dos SMA, a anarquia pode-se estabelecer facilmente:
 - Em sistemas com dimensão ou complexidade razoáveis, agentes possuem um visão parcial do mundo e conhecimento e objectivos locais que poderão entrar em conflito com os dos outros agentes.
 - Agentes estão habilitados a interagir com os outros agentes do sistema e, tal como em qualquer sociedade, estas interacções podem provocar grande confusão, desordem e desorganização, conduzindo à anarquia
 - Nenhum agente possui uma visão global e autoridade sobre o sistema pelo que será necessário que os agentes coordenem as suas actividades voluntariamente com os restantes agentes do sistema.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 22



SMA Cooperativos vs Competitivos

- SMA cooperativos:
 - Usualmente projectados por uma única, ou múltiplas, mas no entanto interdependentes, entidades
 - Agentes agem de forma a incrementar a utilidade global do sistema e não a sua utilidade pessoal
 - Preocupação com o aumento do desempenho global do sistema e não do desempenho individual dos agentes
- SMA compostos por agentes competitivos (“self-interested”):
 - Cada agente é projectado por um projectista distinto
 - Agentes têm a sua própria agenda e motivação
 - Agentes não estão usualmente interessados no bem da comunidade mas sim na sua satisfação pessoal
 - Usuais em cenários que envolvam aquisição de bens ou serviços, como o comércio electrónico na Internet

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 23



Coordenação de Agentes Competitivos

- Como atingir de acordos em sociedades de agentes competitivos?
- Sociedade competitiva bastante comum entre os humanos:
 - Todos os dias interagimos com agentes com quem não partilhamos objectivos comuns
 - No caso mais extremo a única forma de lucrarmos pode ser à custa dos nossos oponentes
 - Em cenários mais realistas é típico que os agentes partilhem pelo menos alguns objectivos (existe potencial para que possam atingir acordos que sejam mutuamente benéficos)
- Capacidades de negociação e argumentação:
 - Centrais na criação de agentes autónomos capazes de funcionar em sociedades de agentes competitivos
- Negociação é a forma de coordenação por excelência para atingir acordos entre agentes competitivos

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 24



Estrutura da Apresentação

- Agentes e Sistemas Multi-Agente
- Introdução à Coordenação em SMA
- Coordenação de Agentes Cooperativos
 - Modelos de Coordenação
 - Trabalho de Equipa vs Coordenação
 - Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas
 - Partilha de Tarefas e Resultados
 - Coordenação por Planeamento
 - Coordenação por Comunicação, Modelização Mútua, Percepção Inteligente, Parcialmente Hierárquica
 - Coordenação por Conhecimento à Priori, Normas e Leis Sociais e Estratégica
- Conclusões

Luis Paulo Reis

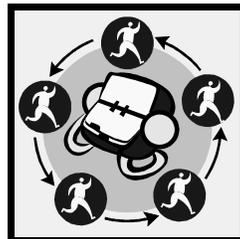
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 25



Coordenação de Agentes Cooperativos

- Como é que um conjunto de agentes se pode coordenar de forma a realizar trabalho cooperativo, em equipa?



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 26



Objectivos da Coordenação

- Objectivos da coordenação de agentes cooperativos:
 - Garantir que todas as partes do problema são resolvidas por pelo menos um agente ou que todas as partes da tarefa cooperativa são executadas
 - Garantir que todos os agentes interagem de forma a permitir que as suas actividades sejam executadas como parte da execução da tarefa cooperativa e desta forma integradas na solução global
 - Garantir que os membros da equipa agem de forma a atingir os objectivos globais e de forma consistente
 - Garantir que os três objectivos anteriores são alcançados dentro dos limites computacionais e dos recursos disponíveis

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 27



Modelo de Coordenação

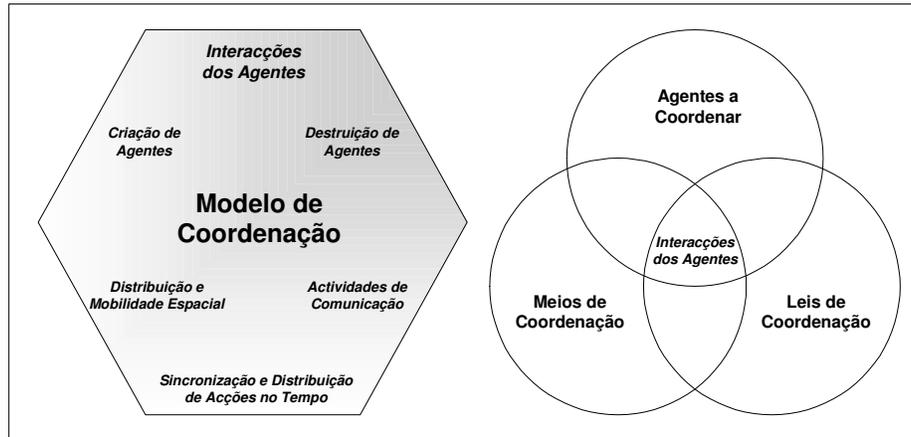
- Esquema formal pelo qual as formas de interacção entre os agentes podem ser expressas:
 - Criação e destruição de agentes
 - Actividades de comunicação dos agentes
 - Distribuição e mobilidade espacial dos agentes
 - Sincronização e distribuição das acções dos agentes ao longo do tempo.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 28

Modelo de Coordenação



Modelo de Coordenação

▪ Elementos do Modelo:

- **Os Coordenáveis.** As entidades cujas interações mútuas vão ser regidas pelo modelo de coordenação, i.e, os agentes no SMA
- **Os Meios de Coordenação.** Abstracções utilizadas que permitem as interações entre os agentes e o núcleo em torno do qual os agentes se encontram organizados (meios de interacção, canais de comunicação, etc)
- **Leis de Coordenação.** Definem a forma de utilização dos meios de coordenação nos eventos de interacção:
 - Linguagem de comunicação (sintaxe utilizada na troca de dados)
 - Linguagem de coordenação (primitivas de interacção e sua semântica).



Trabalho de Equipa—“TeamWork”

- Coordenação de equipas de agentes cooperativos
- *Trabalho de equipa* (“*teamwork*”):
 - “Esforço cooperativo dos membros de uma equipa para atingir um objectivo comum” [AHD, 2000].
- *Equipa*:
 - “Conjunto distinguível de 2 ou mais indivíduos que interagem de forma dinâmica, interdependente e adaptativa de forma a atingirem objectivos comuns, partilhados e especificados”
- *Teamwork* cada vez mais crítico em ambientes multi-agente:
 - Treino virtual
 - Educação interactiva
 - Integração de informação na Internet
 - Futebol robótico simulado
 - Entretenimento interactivo
 - Missões multi-robô.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 31



Teamwork vs Coordenação

- Trabalho de equipa é uma subárea da coordenação
- Algumas técnicas de coordenação não podem ser consideradas trabalho de equipa.
- Exemplo:
 - Trânsito normal, embora coordenado não pode ser considerado trabalho de equipa
 - Conduzir em caravana de veículos é claramente trabalho de equipa
 - Em ambos os casos existe coordenação!
 - Trabalho de equipa envolve objectivos comuns e cooperação entre os membro de equipa

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 32



Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas

- Três fases que podem ocorrer iterativamente:
 - **Decomposição do Problema.** O problema original é decomposto em diversos subproblemas de dimensão e complexidade menor. Cada um dos subproblemas é alocado a um ou mais agentes para efectuar a sua resolução
 - **Resolução dos Subproblemas.** Subproblemas são resolvidos pelos diversos agentes envolvidos no processo
 - **Síntese da Solução.** A solução final é obtida através da fusão das respostas obtidas pelos diferentes agentes para cada um dos subproblemas

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 33



Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas

- Principais preocupações e tópicos de investigação:
 - Como pode um problema ser decomposto em tarefas menos complexas e essas tarefas distribuídas entre os agentes?
 - Como pode a solução global do problema ser sintetizada a partir das soluções parciais dos vários subproblemas?
 - Como podem as actividades de resolução de problemas dos agente ser optimizadas de forma a produzir uma solução que optimize a coerência?
 - Que metodologias podem ser utilizadas de forma a coordenar a actividade dos agentes e evitar interacções destrutivas e a maximizar a eficiência das interacções positivas?

Luis Paulo Reis

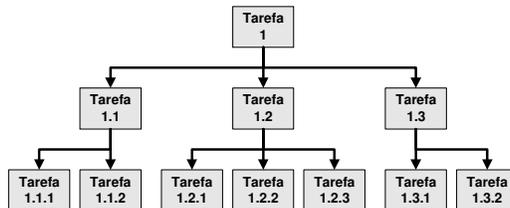
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 34

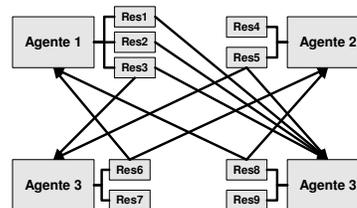


Coordenação por Partilha de Tarefas e Resultados

- Partilha de Tarefas
- Partilha de Resultados



a) Partilha de Tarefas



b) Partilha de Resultados

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 35



Coordenação por Partilha de Tarefas e Resultados

- **Partilha de Tarefas.** Executada quando um dado problema é decomposto e as suas diferentes partes alocadas a agentes distintos.
 - Principal dificuldade: Método de alocação dos problemas aos agentes.
 - Se os agentes tiverem capacidades distintas e forem autónomos podendo inclusivamente recusar a execução de tarefas, o problema torna-se muito complexo.
 - Em domínios que incluam agentes competitivos utiliza-se resolução de conflitos, negociação e leilões
- **Partilha de Resultados.** Troca de informação entre os agentes relevante para a resolução do problema global.
 - Informação pode ser trocada de forma pró-activa (i.e., um agente decide autonomamente enviar informação a outros agentes que pensa lhes poder ser útil) ou
 - reactiva (i.e. o envio de informação é realizado como resposta a pedido de um dado agente).

Luis Paulo Reis

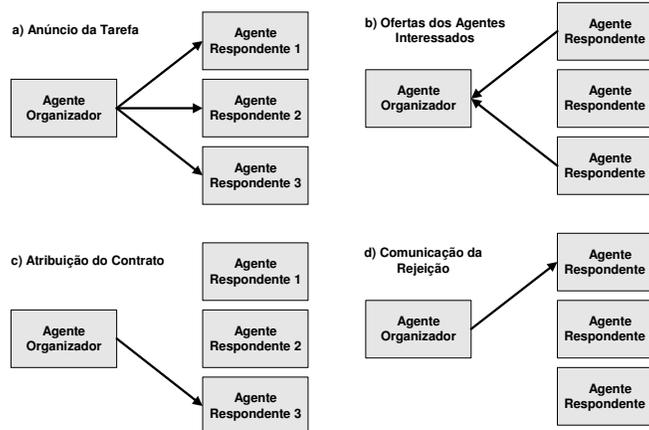
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 36



Partilha de Tarefas: Rede Contratual

▪ Rede Contratual – Contract Net



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 37



Coordenação por Comunicação - Partilha de Resultados

- Partilha de resultados, informação ou conhecimento
- Melhoria da performance dos Agentes:
 - **Confiança.** Soluções calculadas por diferentes agentes, podem ser analisadas em conjunto, verificando a existência de erros e aumentando a confiança na solução global
 - **Complitude.** Os agentes podem comunicar as suas visões locais do problema de forma a atingir uma visão global melhor
 - **Precisão.** Os agentes podem trocar resultados de forma a aumentar a precisão da solução global
 - **Tempo.** O tempo necessário para atingir a solução pode diminuir (disponibilidade de informação adicional pode acelerar o processo de resolução de cada agente)

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 38



Aparecimento de Inconsistências

- **Crenças (informação sobre o estado do mundo)**
 - Surge devido à inacessibilidade do ambiente (visão parcial do mundo disponível a cada agente), ao dinamismo do ambiente e aos erros na percepção dos agentes
- **Objectivos (intenções que desejam atingir)**
 - Surge devido à autonomia dos agentes que não partilham exactamente o mesmo conjunto de objectivos

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 39



Resolução de Inconsistências

- Se o sistema tiver uma dimensão razoável, os agentes forem autónomos e o ambiente inacessível e dinâmico, as inconsistências serão inevitáveis!
- Lidar com as inconsistências:
 - Ignorar as inconsistências
 - Metodologias de revisão de crenças para inconsistências sobre crenças
 - Tratar as inconsistências como conflitos e resolve-las através de negociação
 - Construir sistemas suficientemente robustos para raciocinarem na presença de inconsistências (abordagem é a mais adequada em domínios dinâmicos e inacessíveis)

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 40



Sistema Tolerante a Inconsistências

▪ Características Desejáveis:

- **Independência Relativa aos Eventos.** Resolução de problemas não depende directamente da sequência de eventos. A resolução de problemas é executada de forma oportunística e incremental, de acordo com a disponibilidade de informação e não numa ordem pré-especificada
- **Troca de Informação de Alto-Nível.** Os agentes trocam informação de alto-nível relacionada com os resultados intermédios e não dados em bruto. Isto permite uma muito maior autonomia e independência no comportamento dos agentes
- **Resolução Contínua de Inconsistências.** As incertezas, incorrecções e inconsistências vão sendo resolvidas ao longo do processo de resolução de problemas e não no início e no final do mesmo
- **Metodologia de Resolução Flexível.** A metodologia de cálculo da solução deve ser flexível e não deve estar restringida a um único caminho. A disponibilidade de múltiplos planos para atingir a solução aumenta consideravelmente a robustez do sistema eliminando possíveis gargalos da garrafa nesta resolução.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 41



Coordenação por Planeamento Multi-Agente

- **Planeamento Centralizado de Planos Distribuídos.** Um sistema centralizado de planeamento desenvolve planos para um conjunto de agentes em que a divisão e alocação de tarefas se encontra especificada. O agente central distribui os planos parciais aos restantes agentes que funcionam num nível hierarquicamente inferior (como escravos) e têm a responsabilidade da sua execução
- **Planeamento Distribuído de um Plano Global.** Um grupo de agentes coopera de forma a gerar um plano global de actividades. Agentes componentes do sistema vão ser especialistas em diferentes aspectos necessários para o desenvolvimento do plano global.
- **Planeamento Distribuído de Planos Distribuídos.** Um grupo de agentes coopera de forma a gerar planos individuais de acção, coordenando dinamicamente as suas actividades ao longo desse planeamento.
- Planeamento centralizado é mais simples do que o planeamento distribuído pois o agente central terá uma visão global do problema e pode definir as relações de coordenação que necessitar. No entanto, nem sempre é possível e muitas vezes não é desejável

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 42



PGP – Planeamento Global Parcial

- **Agentes cooperativos realizam troca de informação de forma a chegar a uma solução global para um problema [Durfee]**
- **Fases:**
 - **Geração de Objectivos.** Cada agente decide quais os seus objectivos e define planos de curto-prazo que lhe permitam atingir esses objectivos
 - **Troca de Informação.** Agentes trocam informação relativamente a planos, objectivos e soluções. Troca de informação é essencial para determinar os pontos onde os planos locais dos agentes interactivam com os dos outros agentes
 - **Alteração de Planos Locais.** Agentes alteram os seus planos locais de acordo com a informação disponível

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 43



PGP – Planeamento Global Parcial

- De forma a evitar a incoerência nos estados locais dos agentes, o *PGP* propõe a utilização de uma estrutura de meta-informação que define quais os agentes que devem trocar informação, qual a informação trocada, quais as pré-condições para esta troca (o *Plano Parcial Global*), gerada cooperativamente por todos os agentes:
 - **Objectivos.** Os objectivos partilhados pela comunidade de agentes e que o plano gerado pelo sistema deve resolver;
 - **Mapas de Actividades.** Representando as actividades actuais de cada agente e os resultados esperados dessas actividades;
 - **Grafo de Construção da Solução.** Representando a forma como os agentes devem interagir e a informação que devem trocar de forma a gerar a solução final.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 44



PGP – Planeamento Global Parcial Generalizado

- Estendido por Keith Decker em 1995 com cinco novas metodologias:
 - **Comunicação de Informação.** Para a actualização de perspectivas não-locais. Agentes possuem perspectivas locais em ambientes inacessíveis. Partilha de informação pode auxilia-los a atingir uma visão mais completa do ambiente. Políticas de comunicação: comunicar toda a informação disponível em cada instante; comunicar uma parte seleccionada da informação; ou não comunicar qualquer tipo de informação
 - **Comunicação de Resultados.** Podem ser comunicados: todos os resultados obtidos; resultados que o agente acredite interessarem a outros agentes; ou unicamente os resultados essenciais para o planeamento
 - **Tratamento da Redundância.** A redundância verifica-se quando dois ou mais agentes resolvem o mesmo problema ou subproblema. Redundância pode ser deliberada (desejável colocar mais do que um agente a resolver um dado problema). Aumentar a fiabilidade e a qualidade da solução obtida. Em geral indica o desperdício de recursos e deve ser evitada
 - **Tratamento de Relações Rígidas de Coordenação.** Execução de uma dada acção por parte de um agente interfere com a execução de outra acção por parte de outro agente, por exemplo *enables(T1, T2)*. Relações são evitadas através do reescalamento de acções conflituosas
 - **Tratamento de Relações Flexíveis de Coordenação.** Interferência entre acções conflituosas não é crítica para o sucesso das acções (embora possa alterar a eficiência ou qualidade de execução). O reescalamento não é aqui obrigatório.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 45



PGPG vs PGP

- Em comparação com o *PGP*, o *Planeamento Parcial Global Generalizado*, acrescenta:
 - Escalonamento de tarefas com *deadlines*
 - Heterogeneidade nos agentes
 - Comunicação a múltiplos níveis de abstracção
- Extensões tornam este mecanismo muito mais flexível e utilizável na prática.
- Foi implementado completamente no simulador *TAEMS*

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 46



Teoria das Intenções Conjuntas

- Joint Intentions Framework
- Estado mental conjunto de uma equipa de agentes, designado por *Intenção Conjunta*
- *Compromisso conjunto: objectivo conjunto persistente (OCP).*

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 47



Teoria das Intenções Conjuntas Algoritmo

- Inicialmente todos os agentes acreditam que:
 - É possível realizar o objectivo p ;
 - O objectivo p ainda não foi realizado;
 - A motivação (justificação) M para a realização de p encontra-se presente.
- Todos os agentes da equipa possuem o objectivo p até que uma condição de terminação Z seja verdadeira.
- A condição de terminação Z consiste em que seja mutuamente acreditado que uma das seguintes condições se verifica:
 - O objectivo p está satisfeito;
 - O objectivo p é impossível de satisfazer;
 - A motivação M para realizar p já não se encontra presente.
- Até que a condição Z seja satisfeita, então cada agente:
 - Se acreditar que p foi atingido, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que Z se verifique;
 - Se acreditar que p é impossível, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que Z se verifique;
 - Se acreditar que a motivação M já não é válida, então terá o objectivo de que isto se torne mutuamente acreditado e manterá este objectivo até que Z se verifique;

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 48



Planos Partilhados

- *Planos Partilhados (Shared Plans)* [Grosz e Kraus, 1996] [Grosz e Sidner, 1990]
- Baseado na Teoria das Intenções Conjuntas
- Atitude Mental: Intenção de realizar uma dada acção
- *Plano Partilhado:*
 - *plano completo partilhado (PCP)* ou
 - *plano parcial partilhado (PPP)*.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 49



Planos Partilhados Algoritmo

- Um *plano completo partilhado* para realizar uma dada tarefa conjunta T , consiste numa representação em que todos os aspectos da actividade conjunta T estão especificados. Isto inclui uma crença e acordo mútuo numa receita RT para realizar T . A receita RT especifica um conjunto de acções A , que quando executadas tendo em conta restrições específicas, constituem a realização de T . $PCP(P, G, T, tp, tT, RT)$ denota um plano conjunto P de um grupo G , no instante de tempo tp para fazer uma acção conjunta T , até ao tempo tT , utilizando a receita RT .
- O plano completo parcial $PCP(P, G, T, tp, tT, RT)$ será executado se:
 - Todos os agentes que pertencem ao grupo G , acreditam que RT é uma receita válida para executar T ;
 - Todos os agentes que pertencem ao grupo G , acreditam que todos desejam que o grupo execute T até ao instante de tempo tT ;
 - Para cada acção A_i pertencente ao conjunto A de acções da receita RT :
 - Existe um subgrupo G_i que possui um PCP para A_i utilizando uma receita RA_i ou existe um único agente que possui um plano completo individual para realizar essa acção;
 - Os restantes membros do grupo G acreditam que existe uma receita disponível ao grupo G_i que permita a este grupo executar A_i utilizando um dado plano;
 - Os restantes membros do grupo G desejam que o grupo G_i consiga executar A_i utilizando um qualquer plano;

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 50



Locker Room Agreement

- *Locker Room Agreement* (Acordo de Balneário)
- Aplicado com sucesso no Futebol Robótico
- O mecanismo baseia-se na definição de uma estrutura flexível de equipa baseada em [Stone, 1998]:
 - Papéis (*roles*) que especificam o comportamento de um agente individual e mecanismos para realizar a sua troca entre agentes;
 - Formações compostas por colecções de papéis e condições para a activação destas formações;
 - Planos multi-agente (*set-plays*) para execução em situações específicas.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 51



Locker Room Agreement

- Estrutura, partilhada à partida por todos os membros da equipa
- Domínios dinâmicos e com comunicação restringida ou mesmo inexistente
- Papéis especificam o comportamento de um agente individual de forma flexível.
- Formações decompõe o espaço de tarefas num conjunto de papéis que são posteriormente atribuídos aos vários agentes.
- Numa equipa de n agentes, $T = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, uma formação assume a forma:
 - $F = \{R, \{U_1, U_2, \dots, U_k\}\}$
 - Onde $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_n\}$ tal que $i \neq j \Rightarrow r_i \neq r_j$ representa um conjunto de papéis.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 52



TAEMS Framework

- *TAEMS – Task Analysis, Environment Modeling and Simulation*,
- Esquema para modelizar ambientes com tarefas computacionais complexas
- Representar de forma independente do domínio, problemas complexos de coordenação de agentes
- Permite analisar e simular quantitativamente o comportamento de um SMA
- Linguagem que permite especificar as características de um SMA mas também um sistema de simulação
- O *TAEMS* suporta uma descrição em camadas das características do ambiente e da tarefa [Decker, 1995] [Decker, 1996]:
 - **Nível Objectivo.** A parte objectiva ou real descreve o essencial da estrutura de tarefas e ambiente. É essencialmente uma descrição formal da tarefa sem informação sobre os agentes em particular;
 - **Nível Subjectivo.** Descrevendo a forma como os agentes vêem e interagem com a tarefa a executar ao longo do tempo. Isto inclui a forma como os agentes se apercebem do estado do mundo.
 - **Nível Generativo.** Descrevendo as características estatísticas necessárias para gerar a informação objectiva e subjectiva num dado domínio. Este nível permite gerar diferentes problemas com as mesmas características evitando instâncias únicas.

Luis Paulo Reis

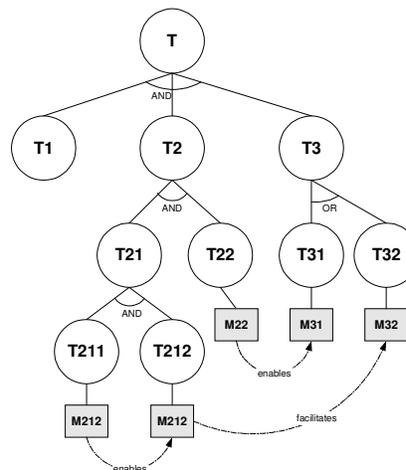
Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 53



TAEMS Framework Estrutura de Tarefas

- Problema de coordenação representado como um conjunto de grupos de tarefas.
- Grupo de tarefas GT , representa um conjunto de acções interrelacionadas e possui um tempo de chegada $Ar(T)$ e uma *deadline* $D(T)$.
- Estrutura de um grupo de tarefas: árvore em que cada nó corresponde a uma tarefa T .



Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 54



Coordenação por Modelização Mútua

- Coordenação sem Comunicação
- Cada agente efectue a criação de um modelo de cada um dos agentes da sua equipa.
- Este modelo deverá permitir que cada agente se coloque no lugar de um outro agente e possa prever quais serão as suas acções numa dada circunstância.
- Modelo: crenças, intenções, desejos, capacidades, e outra informação relevante de cada um dos outros agentes.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 55



Coordenação por Modelização Mútua Exemplo: Sistema *MACE*

- **Conhecimento dos outros agentes:**
 - **Classe.** Os agentes *MACE* encontram-se organizados em grupos designados por classes;
 - **Nome.** Cada agente possui um nome único na classe. O par (classe, nome) identifica cada um dos agentes;
 - **Papéis.** Descrevendo as funções dos agentes no interior de cada classe;
 - **Capacidades (*Skills*).** Capacidades dos outros agentes, em termos das funções e tarefas que são capazes de executar ou recursos que são capazes de providenciar;
 - **Objectivos (*Goals*).** Objectivos dos outros agentes;
 - **Planos.** Perspectiva do agente sobre a forma como os outros agentes irão atingir os seus objectivos. É descrita como uma lista de capacidades (*skills*) e operações que o agente irá executar para conseguir os seus objectivos.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 56



Coordenação por Modelização Mútua Exemplo: Sistema *ARCHON*

- Aplicações reais:
 - Gestão da distribuição de energia eléctrica
 - Controlo de um acelerador de partículas
- Cada agente, possuía:
 - Informação e conhecimento de resolução de problemas num dado domínio
 - Modelo próprio
 - Modelo de todos os outros agentes presentes na comunidade (*acquaintance models*)
- Módulo de planeamento e coordenação dos agentes era então responsável por utilizar esta informação e decidir as acções e comunicações a executar em cada instante.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 57



Coordenação por Percepção Inteligente

- Visão activa e Percepção activa (década de 80)
- Comunicação implícita através da percepção
- Utilização inteligente de sensores configuráveis: Direcção, precisão, alcance
- Exemplo: SLM – Strategic Looking Mechanism

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 58



Coordenação por Organização Estrutural - Normas e Leis Sociais

- Inspira-se em modelos humanos e deriva da disciplina da sociologia.
- *Norma*: padrão de comportamento preestabelecido
- *Lei social*: significado semelhante mas inclui em si própria uma noção de autoridade.
- Na sociedade, os exemplos de normas e leis sociais são abundantes:
 - Uma *norma* consiste na regra assumida por todos de que: “numa paragem de autocarro, quem chega primeiro será o primeiro a entrar no autocarro”. Não existe nenhuma autoridade que verifique esta norma pelo que são os próprios agentes a regularem os seus comportamentos de forma a obedecerem à norma.
 - Uma *lei social* pode, por exemplo, corresponder à necessidade de pagar a conta no final de um jantar no restaurante. Existe uma autoridade, no caso a polícia, que tem o poder para verificar que a lei é obedecida e aplicar sanções ao agente caso contrário. Neste mesmo exemplo, uma *norma* poderá consistir em dar uma gorjeta ao empregado

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 59



Coordenação por Organização Estrutural

- As normas e leis sociais podem existir dentro de um Sistema Multi-Agente de duas formas:
 - **Projectadas off-line**. Nesta abordagem as leis sociais são definidas à-priori e implantadas no interior dos agentes;
 - **Emergentes on-line**. Nesta abordagem as leis sociais emergem do funcionamento do próprio sistema e são adquiridas no decurso da sua operação pelos agentes;
- Primeira abordagem é mais fácil de implementar e permite ao projectista do sistema possuir um maior controlo sobre o seu modo de operação.
- Aquisição de leis sociais *on-line* possui a grande vantagem de permitir adquirir leis sociais desconhecidas ou inexistentes à partida, sendo desta forma adequada para a utilização em ambientes abertos tais como a Internet ou ambientes derivados do mundo-real.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 60



Coordenação por Conhecimento à-Priori

- A coordenação por conhecimento à-priori engloba grande parte da investigação realizada no âmbito da coordenação por normas e leis sociais projectadas off-line,
- Conceito de coordenação por conhecimento à-priori é mais abrangente:
 - Conhecimento não se limita a normas e leis sociais
 - Pode incluir estruturas mais complexas como sejam táticas, formações espaciais, modelos de outros agentes (colegas e/ou agentes hostis), planos flexíveis, etc.
- *Exemplos:*
 - *Acordo de balneário (locker-room agreement)* [Stone, 1998]
 - *Coordenação Estratégica* [Reis, 2002]

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 61



Coordenação por Conhecimento à-Priori

- **Aplicação no Futebol Robótico:**
 - **Regiões.** Futebol implica a movimentação espacial dos agentes;
 - **Situações.** Contendo a definição lógica de situações que possa implicar uma mudança de comportamento dos agentes;
 - **Formações.** Contendo distribuições espaciais e formas de movimentação de todos os agentes;
 - **Modelos dos Colegas.** permitir a realização de coordenação por modelização mútua;
 - **Modelos dos Adversários.** permitir a realização de coordenação por modelização mútua;
 - **Modelo da Equipa Adversária.** Comportamento esperado da equipa oponente que é utilizada na definição da estratégia da equipa e no decurso do jogo na alteração da tática em utilização;
 - **Planos Flexíveis.** Utilizados em situações de jogo e que permitem a execução de uma determinada tarefa colectiva;
 - **Estratégias de Comunicação.** Permitir diferentes tipos de comunicação entre os agentes;
 - **Papéis.** Comportamentos individuais de cada agente. Cada agente possui uma biblioteca de papéis e em cada instante desempenha um único papel;
 - **Táticas.** Contendo a definição do comportamento global da equipa e a utilização das formações, papéis, planos e estratégias de comunicação no seu âmbito. Cada tática possui condições de activação e utiliza formações distintas para situações distintas.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide N° 62



Coordenação por Controlo Parcialmente Hierárquico

- Autonomia completa dos agentes envolvidos no sentido da inexistência de uma noção de hierarquia entre eles?
- Falso em grande parte dos sistemas sociais humanos:
 - Compostos por agentes a diferentes níveis de hierarquia que no entanto possuem uma dose considerável de autonomia.
 - Agentes possuem autonomia suficiente para tomar as suas próprias decisões mas aceitam instruções, conselhos ou mesmo ordens
- Ordens recebidas de agentes hierarquicamente superiores não podem ser tomadas como ordens absolutas. Sobretudo se estas ordens ou instruções entrarem em conflito com as intenções do agente
- Como pode ser integrada a informação enviada pelo agente hierarquicamente superior de forma consistente no conjunto de crenças e intenções do agente?

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 63



Coordenação por Controlo Parcialmente Hierárquico

- Gestão de instruções conflituosas
- Critérios para determinar a forma de resolução do conflito:
 - **Especificidade.** As instruções mais restritivas são seguidas com maior prioridade;
 - **Novidade.** As instruções mas recentes são seguidas com maior prioridade;
 - **Autoridade.** As instruções de agentes hierarquicamente superiores são seguidas com maior prioridade;
 - **Fiabilidade.** As instruções que conduzem a uma probabilidade de sucesso são seguidas com maior prioridade.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 64



Coordenação por Controlo Parcialmente Hierárquico

- No Futebol Robótico:
 - Jogadores têm de fundir informação do Treinador com as suas regras de actuação locais
 - Linguagem Coach Unilang
 - Mecanismo de integração de regras fornecidas pelo treinador no conhecimento de cada agente

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 65



Coordenação Estratégica

- Baseada na coordenação por conhecimento à priori podendo ser considerada uma instanciação desta
- Definição de uma estratégia que é composta por um conjunto de táticas que implicam diferentes formas de actuação da equipa como um todo
- Cada tática utiliza um conjunto de formações. Dependendo da situação global, a formação mais adequada é seleccionada em cada instante
- Cada formação atribui a cada agente um papel e, no caso de domínios espaciais, um esquema de posicionamento dinâmico.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 66



Coordenação Estratégica

- Aplicação da coordenação estratégica são:
 - Criação de uma biblioteca de táticas e, no caso de domínios espaciais, formações adequadas ao domínio;
 - Conceito de situação e a definição de situações facilmente identificáveis pelos agentes que permitam efectuar a troca dinâmica de táticas e formações;
 - Conceito de papel como forma de definição do comportamento individual de um jogador como parte da equipa;
 - Definição de papéis adequados à tarefa cooperativa a realizar e de mecanismos que permitam aos agentes uma troca dinâmica de papéis.
 - Definição de mecanismos que permitam a degradação suave de táticas e formações no caso de as perspectivas distintas dos agentes os levarem a identificações distintas da situação;
 - Definição de mecanismos de posicionamento flexíveis, dinâmicos e adequados ao domínio;

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 67



Coordenação Estratégica

- Aplicação da coordenação estratégica a domínios dinâmicos:
 - Coordenação Situacional (Temporal);
 - Coordenação Espacial por Posicionamento Estratégico;
 - Coordenação por Definição e Troca de Papéis.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 68



Coordenação Estratégica

- Troca Dinâmica de Papéis e Posicionamentos:
- Troca de papéis de dois agentes A_i e A_j é realizada baseada em:
 - Distâncias relativas das posições $Pos(A_i)$ e $Pos(A_j)$ dos agente A_i e A_j às posições estratégicas $PosEst(P_i)$ e $PosEst(P_j)$ dos papéis P_i e P_j ;
 - Adequação dos agentes A_i e A_j aos papéis P_i e P_j , ou seja: $Adeq(A_i, P_i)$, $Adeq(A_i, P_j)$, $Adeq(A_j, P_i)$ e $Adeq(A_j, P_j)$;
 - Importâncias $Imp(P_i)$ e $Imp(P_j)$ dos papéis P_i e P_j para a equipa.

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 69



Estrutura da Apresentação

- Agentes e Sistemas Multi-Agente
- Introdução à Coordenação em SMA
- Coordenação de Agentes Cooperativos
- Conclusões

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 70



Conclusões

- Distinção entre Coordenação em SMA competitivos e SMA cooperativos
- Distinção entre “Coordenação” e “Trabalho de Equipa – Teamwork”
- Como criar metodologias que permitam a equipas de agentes operarem harmoniosamente em conjunto, i.e. metodologias que permitam coordenar eficientemente agentes?
- Como criar equipas de agentes para domínios complexos e dinâmicos?

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 71



Conclusões

- Incerteza em domínios dinâmicos e complexos, impede um trabalho de equipa coerente
- Diferentes membros da equipa possuem visões parciais e inconsistentes do seu ambiente
- Mecanismos de coordenação e comunicação flexíveis e de alto-nível são a chave para fazer face ao dinamismo, incerteza e complexidade dos domínios.
- Necessário avaliar a performance da equipa e ter capacidade para reorganizar a equipa de agentes dinamicamente de acordo com as contingências.
- Maioria das metodologias de coordenação de agentes cooperativos não serve para domínios espaciais, dinâmicos, etc.
- Coordenação Estratégica essencial nestes domínios

Luis Paulo Reis

Mestrado em Inteligência Artificial e Computação

Slide Nº 72