

UMA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A ROBÓTICA



Por:
Eugénio
Oliveira,



Paulo
Lopes



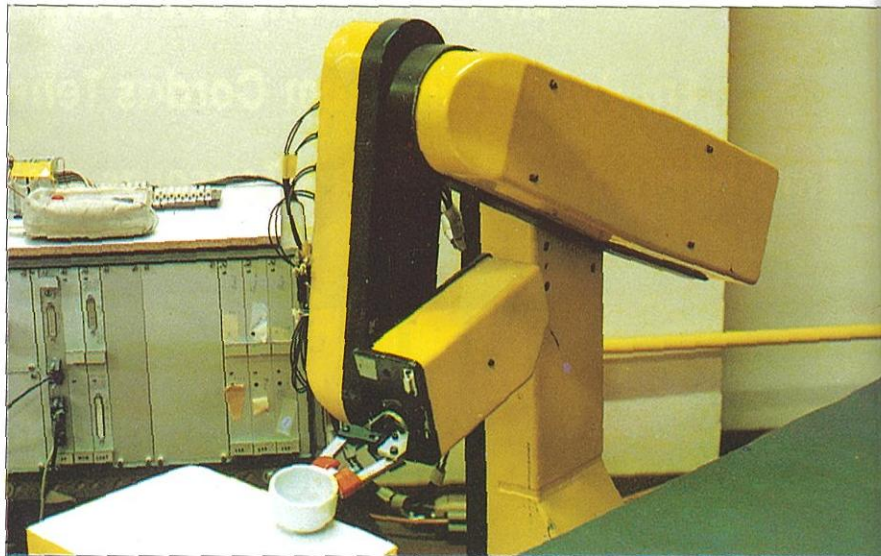
e
Carlos
Ramos

1. Motivação da Inteligência Artificial na Robótica

Quando na década de oitenta a JIRA (Japanese Industrial Robotic Association) fez um inquérito para conhecer a realidade dos robots instalados e a previsível evolução da Robótica, várias conclusões se perfilaram:

- a maior percentagem de robots existentes pertencia às empresas laboratórios e universidades japonesas;
- os Estados Unidos e a Europa Ocidental partilhavam em grande medida a restante “população” robótica;
- os robots de primeira ou segunda geração tenderiam

O Núcleo de Inteligência Artificial & Robótica (NIA&R) da FEUP tem entre os seus objectivos o estudo e desenvolvimento das Metodologias da Inteligência Artificial e a sua aplicação à Robótica.



a decrescer em número e importância;

- Os robots com capacidades adaptativas - nomeadamente para a montagem de peças - cresceriam significativamente.

Enquanto que as duas primeiras afirmações sofreram contestação - os japoneses consideravam robot qualquer máquina de controlo numérico - as duas últimas receberam aceitação quase unânime.

NIA&R - NÚCLEO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL & ROBÓTICA DA FEUP

A - O NIA&R É constituído por um corpo de investigadores cuja principal preocupação se centra na área das Metodologias de Aplicação da Inteligência Artificial.

- No domínio das Metodologias são estudados os seguintes aspectos:
 - Representação do Conhecimento (descritivo, geométrico)
 - Arquitecturas de Sistemas Inteligentes
 - Raciocínio Baseado em Modelos
 - Cooperação entre Sistemas Inteligentes (IA Distribuída)
 - Interfaces Homem-Computador
 - Redes Neurais.
- No domínio das Aplicações:
 - *Experts Systems* (Medicina, Sector Bancário, Planificação do Território, ...);
 - Tutores Inteligentes;
 - Robótica Inteligente;
 - Sistemas Cooperativos aplicados à Gestão de Redes (Eléctricas, Gás, Viárias);
 - Previsão (de consumos, de evolução de Empresas, ...).

B - O NIA&R Tem a orientação científica do Doutor Eugénio Oliveira e é constituído por cerca de 10 colaboradores (assistentes e bolseiros)

- Projectos actuais
 - Archon (Architecture for Cooperative Heterogeneous On-Line Expert Systems) - do Programa Europeu ESPRIT;
 - Sistema Pericial para a Cardiologia Co-financiado pela FLAD e Hospital S. João;
 - Metodologias da IA - Centro do INIC (CEEUP - linha 4);
 - Sistemas Tutoriais Inteligentes - Co-financiado pelo Minerva
- O NIA&R tem ainda vários projectos europeus em estado de negociação

C - NIA&R dispõe de equipamento próprio na gama das *Workstations* com Unix, PC 386, Macintosh, Robot manipulador, Câmara para Visão Artificial e *Laser*.

D - Os membros do NIA&R integram o recém criado LIACC - Laboratório de Inteligência Artificial e Ciências da Computação da Universidade do Porto.

Se as previsões se vão ou não cumprir, não cabe aqui discuti-lo em profundidade.

Mas há que realçar que as equipas de I&D nos EUA, na Europa e, evidentemente, no próprio Japão lançaram um grande número de projectos que, a terem êxito, teriam como consequência a realização das previsões. É nessa linha que aqui descrevemos os objectivos deste artigo:

I - definir o enquadramento da investigação em Robótica Inteligente;

II - descrever sucintamente algumas direcções que o NIA&R explora.

2. Problemas na Robótica de hoje

Damos como aceitável que a Robótica Flexível ganhará cada vez mais importância na indústria, nos serviços, na escola e na vida doméstica.

O primeiro corolário que ressalta é: só a inclusão de funções "inteligentes" tornarão os robots flexíveis, isto é, adaptáveis.

Como definimos então o objecto do novo estudo, isto é, o robot "inteligente"?

Um sistema actuador no mundo físico com capacidades de percepção e interpretação.

O grau de sofisticação destas três funções - percepção, interpretação e actuação - está directamente relacionado com a medida da flexibilidade (capacidade de actuar sobre conjuntos diversos de peças), "inteligência" e robustez (capacidade de actuar em ambiente não estruturado) que um robot possui.

É um facto indesmentível que hoje, a grande maioria dos robots existentes estão longe de possuir tais características e isso devido a várias razões:

- a) poucas capacidades de percepção;
- b) dificuldades de programação;
- c) nenhuma capacidade de decisão;
- d) rapidez e precisão insuficientes.

O último ponto foi objecto dos mais significativos avanços.

É, agora, importante centrar as atenções nos três primeiros pontos porque são aqueles que mais problemas colocam.

3. Robótica de Montagem

A primeira linha de montagem que se considerou robotizada foi a de produção de baterias secas durante os anos 30 e este conjunto de máquinas estava perfeitamente ajustado àquelas peças sem grandes hipóteses de variação (a não ser que envolvessem um grande volume de novas peças para justificar economicamente o esforço da alteração).

A montagem de algumas partes de um motor Kawasaki em 1974, foi uma primeira realização da robótica de montagem flexível mas é sem dúvida na indústria dos componentes electrónicos que o avanço foi mais espectacular quer na flexibilidade quer na velocidade e, sobretudo, na precisão conseguida. Tal se deve em grande parte às características dos circuitos integrados, standardizados, facilmente visualizáveis e leves.

Ainda recentemente Peter Hanna, da "Black & Decker", apostando na robótica de montagem aponta no entanto uma mudança de orientação: "escravizar a máquina ao operador em vez

deste aquela".

Mas quanto tempo será ainda necessário para tal?

4. Que investigação para a Robótica?

A Robótica é hoje um campo de eleição para a fertilização cruzada de várias disciplinas.

A mecânica preocupa-se com a estrutura física, a electrotécnica com a energia e as comunicações, a teoria de controlo com a estabilidade do movimento, a informática com a sua programação e, juntamente com a electrónica, também os sensores. A Inteligência Artificial, por sua vez, tem em vista permitir ao robot capacidades de interpretação e decisão sobre as acções a tomar. Gestão integrada de fábricas ou linhas de produção, aspectos sociológicos, filosóficos, políticos ou económicos são outras tantas facetas que a Robótica tem estimulado e atestam a sua importância na sociedade do futuro.

No entanto interessa-nos aqui focar somente a abordagem

- Metodologia e objectivos
- da Inteligência Artificial aplicada à Robótica.

Quais são as funções que, a curto prazo, poderemos ver incorporadas num robot com características minimamente inteligentes?

- Comunicabilidade
- Percepção
- Decisão
- Flexibilidade

Por comunicabilidade entendemos a possibilidade que um operador tem de transmitir ordem ao robot em linguagem "amigável" e deste receber eventual resposta.

A percepção implica a possibilidade de trabalhar em anel fechado (*closed loop*) com o mundo exterior.

Trata-se não só de poder captar sinais sensoriais - forças, imagens, tacto e proximidade

- mas fundamentalmente de os interpretar e integrar num contexto particular a cada cena. A capacidade de Decisão, embora limitada, implica conhecimento, algoritmos e heurísticas que permitam ao robot, dinamicamente - isto é, em cada momento - escolher as melhores acções a executar.

O que fazer para resolver um dado problema - planeamento - e como fazer - comandar os seus actuadores.

Finalmente a flexibilidade é o que permite a rentabilização sem grandes custos de um robot ou célula robótica para um maior leque de tarefas se bem que, estamos em crer, dentro da mesma classe de situações e problemas.

5. Classes e Aplicações

Os dois grandes grupos de aplicações que hoje motivam os estudos em Robótica e que, grosso modo, se podem ligar à indústria e à defesa caracterizam-se pela busca dos melhores:

- robots manipuladores de montagem de peças;
- robots móveis autónomos.

Os dois tipos de robots incentivam o estudo de áreas e métodos semelhantes em certos aspectos nucleares como, interpretação sensorial e algoritmos de decisão, mas implicam também problemas específicos a cada um deles como o da manipulação e dos sensores de força (*robot de montagem*) ou da navegabilidade (*robot móvel*). No entanto duas características associadas às funções de percepção - a visão por computador - e da decisão - o planeamento Inteligente - são comuns a toda a Robótica Inteligente.

Por isso, visão, planeamento e arquitecturas (Oliveira-91) são preocupações do NIA&R e concentram as nossas contribuições específicas para a Investigação & Desenvolvimento no domínio da Robótica.

a generalidade dos sensores fornece. É a visão por computador que se vai encarregar da aquisição e tratamento daquela informação e que por isso, constitui actualmente uma das vertentes de trabalho no NIA&R.

de suporte e que consiste no elo de ligação entre o mundo físico e os algoritmos de inspecção. Encontram-se neste nível o controlo directo da placa de aquisição de imagem, ou seja, do seu modo de funcionamento assim como a gestão de memória associada a cada imagem.

O passo seguinte consiste no melhoramento da imagem que se dispõe, ou seja, na aplicação de filtros que a transformem. Em geral, esses filtros destinam-se a eliminar efeitos indesejáveis como a ocorrência de ruídos de origem diversa ou a desfocagem. Outros filtros, por seu lado, são usados para evidenciar alguma característica especial, das quais se pode destacar a obtenção de contraste, de bordas, etc. São estes últimos aliás, que permitem preparar a imagem para inspecção a nível simbólico.



6. A Visão por Computador

Qualquer robot que se pretenda com um certo grau de autonomia e flexibilidade, isto é, cuja tarefa não seja somente a de reproduzir movimentos pré-registados, requer capacidade de percepção do ambiente que o rodeia. A instalação de sensores de proximidade ou presença permite detectar situações particulares simples capazes de seleccionar acções do robot de uma forma também pré-determinada. São exemplos a detecção da inexistência de peças num alimentador em linhas de montagem, a ordem de cessação/continuação do trabalho repetitivo, comutação para outra tarefa, etc.

O conhecimento de um ambiente supostamente desconhecido e não completamente estruturado, implica uma maior complexidade assim como um volume substancialmente maior de informação a tratar e não apenas do tipo binário sim/não que

6.1. O Hardware

Basicamente um sistema de visão é constituído por uma ou mais câmaras, um monitor, uma placa de aquisição de imagem e de um computador onde aquela é inserida e que funciona como centro de processamento.

Inicialmente uma imagem não é mais que uma matriz de intensidades (512 x 512, 640 x 480, ...) cada uma associada a um pixel da câmara.

Cabe ao sistema a tarefa de modificar, agrupar, medir e interpretar devidamente todo esse conjunto de valores de forma a poder dar conhecimento a instâncias superiores de decisão ou mesmo directamente ao operador da estrutura da estrutura do ambiente que se pretende manipular.

6.2. Fases de Processamento

A tarefa mais imediata é no entanto a de controlar todo o *hardware*

Uma vez obtida a imagem com a qualidade requerida, há que proceder à inspecção do seu conteúdo, i.e., extrair características geométricas das formas detectadas como a sua área, o seu perímetro e posicioná-las correctamente em relação a referenciais adequados.

A etapa final é a identificação com sucesso das formas encontradas, para a qual contribuem todos os dados até aí recolhidos e da qual depende em larga medida o grau de autonomia do robot. Todo esse trabalho de identificação requer um conhecimento prévio de características dos objectos supostamente incluídos no ambiente que rodeia o robot.

Posto isto, construiu-se uma base de dados referente a todos os modelos conhecidos e a que o sistema acede em qualquer altura julgada necessária.

O sistema de visão efectua então uma comparação de cada forma encontrada com todos os modelos que conhece e em todas as posições possíveis (estados estáveis), sendo

atribuído a cada operação destas um coeficiente de *matching* representativo do grau de parelha existente entre a imagem e o modelo considerado.

Por escolha do maior desses coeficientes, desde que se encontre acima dum dado valor considerado mínimo, encontra-se a identidade de cada forma.

Quando uma tal identificação é feita, é de imediato associado um nome à forma para futura referência.

Em certas situações excepcionais como a oclusão parcial de objectos

ou a sua sobreposição, há a necessidade de recorrer a metodologias alternativas de inspecção que pode, por exemplo, envolver um feixe *laser* para medição de valores de altura. Para resolver estas situações difíceis foi instalado um sistema de varrimento com *laser* que consegue obter tais valores (alturas) com base no efeito estereoscópico. Uma vez cumprida a missão de inspecionar o ambiente com o conhecimento da identidade dos objectos visíveis, sua localização e suas características geométricas,

encontram-se reunidas as condições para a tomada de decisões quanto à forma de os manipular.

Tal é a tarefa do planeador de acções que terá que operar com a informação cedida pelo sistema de visão, ou seja, com o conhecimento da configuração inicial do seu ambiente de trabalho.

7. Geração Automática de Planos

A geração automática de um plano de montagem é um dos principais temas de investigação quer para a Comunidade Científica da Inteligência Artificial (IA) quer para a Comunidade da Robótica. Algumas abordagens de IA tomaram o problema da geração de planos como um problema geral, sem se dedicar exclusivamente a uma aplicação (Sacerdoti-77).

Em alguns casos essas aproximações foram concretizadas "mundo dos blocos".

No entanto essas aproximações apresentam alguns inconvenientes: são computacionalmente pesadas para uma geração *on-line*; apesar de pretenderem ser tomadas como de finalidade geral, não se adaptam à maioria dos casos concretos de montagem; não indicam o modo como se estabelecerá a *interface* com sistemas de visão, sensores ou com o próprio robot.

Outras abordagens puramente robóticas têm a vantagem de atacarem directamente os problemas concretos da Robótica de Montagem.

No entanto, não se preocupam com as questões de representação do conhecimento.

Há ainda algumas aproximações que estabelecem um compromisso entre ambas as abordagens (Hutchinson-90).

O Gerador de Planos que implementámos tem por principal característica o facto de ser muito eficiente, mesmo estando escrito em PROLOG interpretado. Embora usemos uma abordagem



segundo os princípios do IA não nos esqueçamos de estabelecer a ligação com os problemas concretos da Robótica de Montagem.

Por essa razão foi dada particular atenção à ligação com outros módulos.

É importante notar que só aquando da execução concreta do plano gerado é que nos apercebemos de uma grande quantidade de problemas que podem ocorrer.

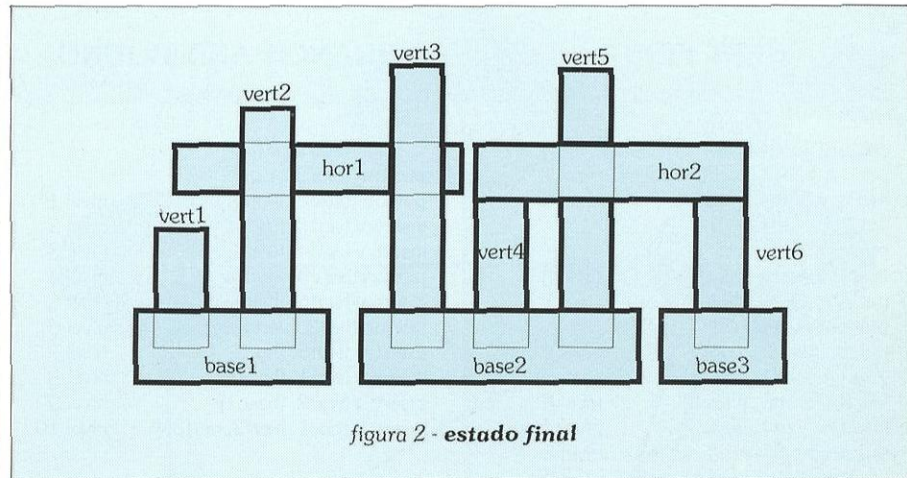
Os conhecidos métodos *Best-First* e *Branch and Bound* foram adaptados ao nosso Gerador de Planos.

O método *Best-First* é um método de pesquisa de uma árvore e baseia-se em heurísticas de modo a escolher a próxima acção a ser executada. É um método muito eficiente, não sendo, contudo, capaz de garantir a melhor solução para um problema genérico visto ter em conta escolhas locais.

O método *Branch and Bound* é um método de pesquisa em grafos que permite obter sempre o melhor caminho entre um nó origem e um nó destino. Não é um método heurístico e é computacionalmente mais custoso.

Na nossa implementação a árvore de pesquisa é construída ao invés de ser apenas visitada.

Relativamente ao *Branch*



and Bound as adaptações foram duas: foi aplicado à construção de uma árvore e baseia-se também em heurísticas.

Isso deve-se ao facto de pretendermos que o método seja o mais eficiente possível.

A função heurística escolhida tem em conta o número de objectos a mover para atingir um objectivo parcial (atender a um estado simbólico final).

Para exemplificarmos o funcionamento do Gerador de Planos iremos considerar as figuras 1 e 2, onde estão representados o estado inicial e final dos objectos.

Aqui é importante verificar que o Gerador de Planos toma como entrada uma descrição simbólica dos estados inicial e final

(por exemplo o objecto base3 está em cima de vert2) enquanto a saída da visão por computador é de natureza diferente (valores numéricos representando posições e orientações).

Foi então criado um Módulo Descritor do Estado dos Objectos que realiza essa conversão.

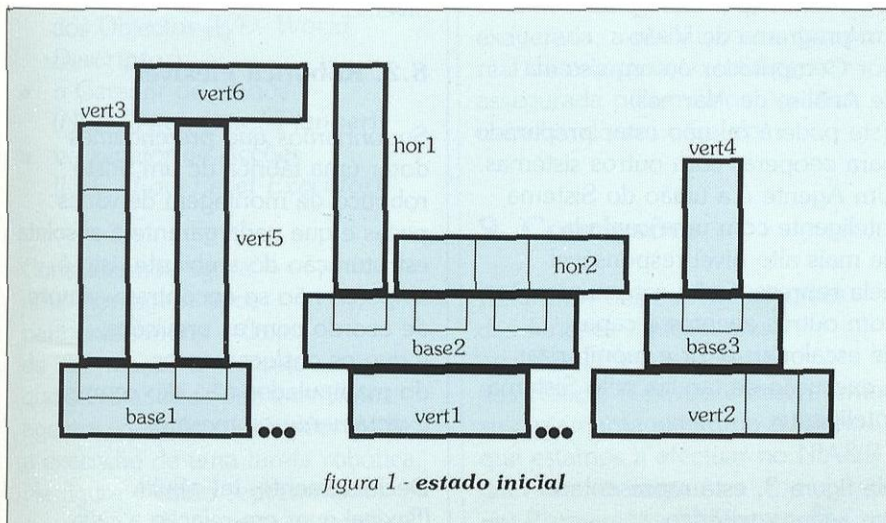
De seguida indica-se o plano gerado para o exemplo segundo os dois métodos descritos anteriormente:

Best-First (custo total 15)
e *Branch and Bound* (custo total 12).
(Ver quadro na página seguinte).

Uma vez gerado o plano o problema que se põe é o modo como deverá ser executado.

Cada operação a alto-nível é analisada e convertida em chamadas a procedimentos escritos em linguagem LM (linguagem de controlo do robot "Renault-APRA" do nosso laboratório).

Por exemplo, uma operação para pôr um objecto em cima de outro pode ser convertida em quatro chamadas a procedimentos LM (previamente escritos): uma chamada *GRASP-ON* para agarrar o objecto; outra chamada *PUT-ON-AUX* para pôr o objecto numa mesa auxiliar; outra chamada *REGRASP* para modificar o estado estável do objecto e finalmente uma chamada *UNGRASP-ON* para pôr



| BEST FIRST | BRANCH AND BOUND |
|---|---|
| put_on_floor (vert4) | put_on_floor (hor1) |
| put_on (base3, [floor]) :nível 1 | put_on_floor (hor2) |
| insert_v (vert 6, [base3]) :nível 2 | put_on (base2, [floor]) :nível 1 |
| put_on_floor (vert5) | insert_v (vert3, [base2]) :nível 2 |
| put_on_floor (vert3) | insert_v (vert4, [base2]) :nível 3 |
| insert_v (vert2, [base1]) :nível 3 | put_on (base3, [floor]) :nível 4 |
| put_on_floor (hor1) | insert_v (vert6, [base 3]) :nível 5 |
| put_on_floor (hor2) | put_on (hor2, [vert4, vert6]) :nível 6 |
| put_on (base2, [floor]) :nível 4 | insert_v (vert5, [hor2, base2]) :nível 7 |
| insert_v (vert1, [base1]) :nível 5 | insert_v (vert1, [base1]) :nível 8 |
| insert_v (vert3, [base2]) :nível 6 | insert_v (vert2, [base1]) :nível 9 |
| insert_v (vert4, [base2]) :nível 7 | insert_h (hor1, [vert2, vert3]) :nível 10 |
| put_on (hor2, [vert4, vert6]) :nível 8 | |
| insert_h (hor1, [vert2, vert3]) :nível 9 | |
| insert_v (vert5, [hor2, base2]) :nível 10 | |



o objecto na posição final. Os argumentos dessas funções irão definir os movimentos físicos que o robot irá efectuar. Finalmente convém notar que ao nível da execução, se torna necessário ter em atenção todo um conjunto de situações de modo a garantir a execução eficaz e segura da tarefa. Alguns exemplos são: a gestão do espaço de trabalho do robot; a análise de restrições geométricas e manipulação inteligente dos objectos.

8. Architecturas

Nos casos, em que diversos tipos de conhecimento independente - ou seja, vários especialistas - são necessários para concluir acerca das melhores atitudes a tomar face às situações criadas, quatro noções básicas são fundamentais:

- Conhecimento diverso (de vários domínios específicos)
- Inteligência
- Distribuição de a) e b)
- Cooperação

A Inteligência Artificial Distribuída é a disciplina do saber que estuda e ensaia as metodologias que tornam possível a cooperação entre sistemas inteligentes distribuídos e cooperativos.

8.1. Comunidade de Sistemas Inteligentes e Cooperantes

A Inteligência Artificial Distribuída (IAD) segue a tendência, no sentido dos sistemas distribuídos, onde se tira partido da execução de uma dada tarefa em várias máquinas ou na mesma máquina mas através de processos diferentes.

De algum modo torna-se necessário que os Sistemas Inteligentes cooperam entre si.

A cooperação não se resume apenas à comunicação envolvendo também o suporte do conhecimento necessário ao bom desempenho da comunidade cooperante.

De seguida vamos distinguir Sistema Inteligente e Agente.

Um Sistema Inteligente tem a ver com um domínio específico e particular (por exemplo, um programa de Visão por Computador ou um sistema de Análise de Alarmes).

Este poderá ou não estar preparado para cooperar com outros sistemas.

Um Agente é a união do Sistema Inteligente com uma camada de mais alto nível responsável pela representação e comunicação com outros agentes e capaz de escalar, gerir e monitorizar a execução de tarefas pelo Sistema Inteligente.

Na figura 3, está representado um agente genérico.

A camada de alto nível envolve os seguintes módulos: Módulo de Comunicação (MC), Módulo de Auto-Conhecimento da Comunidade (MCC) e Monitor. Entre esta camada e o Sistema Inteligente poderá haver a necessidade de estabelecer uma interface.

Não é objectivo deste artigo descrever os pormenores de como o conhecimento dos diversos agentes se encontra distribuído e quais os mecanismos que permitem a cooperação. O objectivo do artigo é sim apresentar através de dois exemplos como o paradigma da IAD é adequado para a resolução de problemas exigindo a distribuição de carga computacional e cooperação de conhecimento diverso.

8.2. Robótica Flexível

Suponhamos que pretendemos dotar uma fábrica de um posto robótico de montagem de várias peças e que nada garante a absoluta estruturação do ambiente, isto é, as peças não se encontram sempre de acordo com as previsões, e que os deslocamentos do manipulador não são sempre exactamente os mesmos.

Decididamente, tal célula (flexível quer em relação a cada

montagem quer em relação à diversidade de montagens possíveis) estará para além do simples manipulador de 1ª geração.

Serão necessárias duas capacidades fundamentais: percepção e capacidade de decisão.

A percepção incluirá sensores - proximidade e/ou força - e ainda visão (bidimensional ou tridimensional).

A capacidade de decisão inclui planificação das acções (neste caso de como montar as peças da forma mais eficiente) e eventualmente monitorização (seguimento) das acções com recuperação de erro.

Ora a complexidade e a diversidade dos sistemas envolvidos implica que estes:

- tenham capacidades próprias específicas de resolução de problemas baseados em conhecimento;
- possam estar implementados em máquinas diferentes;
- consigam cooperar entre si.

Os Agentes envolvidos em tal célula flexível são os seguintes:

- o Reconhecedor de Objectos (*VISION*)
- os Modelos (*MODELS*)
- o Descritor do Mundo dos Objectos (*WD- World Descriptor*)
- o Gerador de Planos (*HLP - High Level Planner*)
- o Executor de Acções (*LLE - Low Level Executor*)

Consideramos agora uma montagem tipo, para analisarmos o fluxo de informação e controlo que se estabelece entre os vários agentes, quando o utilizador pede a execução de uma tarefa robótica. Na figura 4 estão representados os vários pedidos que os agentes

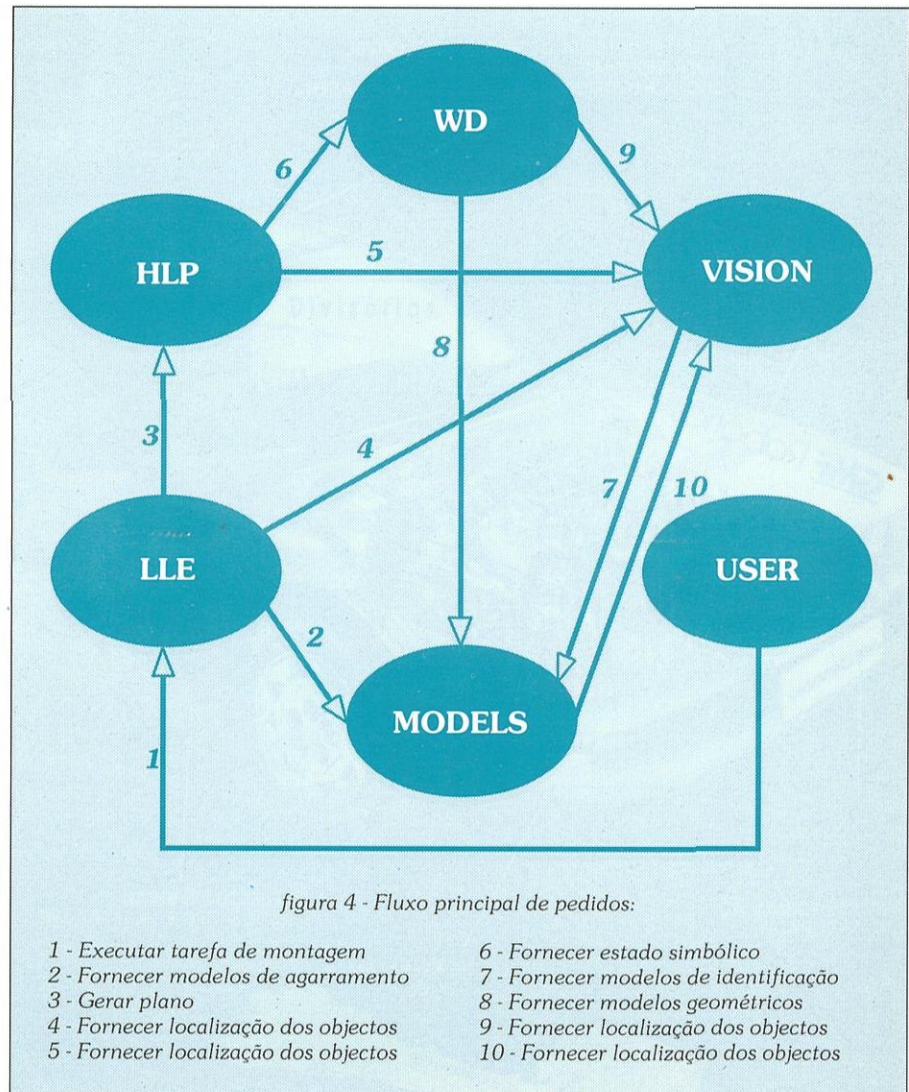


figura 4 - Fluxo principal de pedidos:

formulam de modo a resolver o problema posto pelo utilizador.

São as arquitecturas cooperantes distribuídas que permitem, sem uma sobrecarga computacional exagerada, a resolução em tempo real da computação inteligente assegurada pelos vários Agentes trabalhando em paralelo.

9. Conclusões

Referimos neste artigo algumas das funções "inteligentes" que devem ser associadas aos Robots Flexíveis e descrevemos sucintamente algum do trabalho que estamos a efectuar no NIA&R quer em Visão quer em Planeamento de Tarefas ■

Referências

- [Hutchinson-90] Spar: A Planner that satisfies Operational and Geometric Goals in Uncertain Environments
 S. Hutchinson, A. Kak
 AI Magazine, Spring 1990
- [Oliveira-91] A Multi-Agent Environment in Robotics
 E. Oliveira, R. Camacho, C. Ramos
 Robótica - International Journal of Research in Robotics and AI
 Cambridge Univ. Press, 1991
- [Ramos-91a] The Generation of Efficient High Level Plans and the Robot World Representation in a Cooperative Community of Robotic Agents
 C. Ramos, E. Oliveira
 91 ICAR-5ht Int. Conference on Advanced Robotics
 IEEE Press, Pisa, June, 1991
- [Sacerdoti-77] A Structure for Plans and Behaviour
 E. Sacerdoti
 Elsevier, NY, 1977