Inteligência Artificial

Luís A. Alexandre

UBI

Ano lectivo 2018-19

Conteúdo

Resolução de problemas usando pesquisa

- Um agente, confrontado com várias opções de valor desconhecido, pode decidir o que fazer examinando diferentes possíveis sequências de ações que levam a estados de valor conhecido e decidir qual a melhor sequência.
- O processo de procura desta sequência é chamado **pesquisa**.
- Passos para a resolução de problemas:
  1. Definição do problema
  2. Formulação do objetivo
  3. Pesquisa da solução
  4. Execução da solução

Definição dum problema

- Um problema pode ser definido formalmente usando quatro componentes:
  1. O **estado inicial**.
  2. Uma **descrição das ações possíveis**. Normalmente usa-se a função sucessor `suc()`, que recebe um estado x e devolve pares do tipo `(ação, estado)` em que mostra o estado que se atinge partindo de x e adoptando a respectiva ação.
  3. O **teste de objetivo** que permite avaliar se um dado estado é o estado objetivo.
  4. Uma **função de custo do caminho** que permite atribuir um valor numérico a cada caminho.
- O estado inicial e a função sucessor definem implicitamente o **espaço de estados** do problema, que é o conjunto de todos os estados que se podem alcançar partindo do estado inicial, usando qualquer sequência de ações.
- O espaço de estados forma um **grafo** dirigido em que os nodos são estados e as arestas são ações.

Definição dum problema

- Um **caminho** no espaço de estados é uma sequência de estados ligados por uma sequência de ações.
- O **custo de cada passo**, que denotaremos por $c(x, a, y)$, é o custo de ir do estado x ao y pela ação a.
- A **solução** de um problema é um caminho do estado inicial ao estado objetivo.
- A qualidade da solução é medida pela função de custo do caminho.
- Uma solução diz-se **óptima** se for a que tem menor custo entre todas as soluções.

Simplificações

- Ao definirmos o problema da IA como acabámos de fazer estamos a contar com uma série de simplificações:
  1. O ambiente é **estático**: durante a execução da solução não existe qualquer alteração ao ambiente.
  2. O ambiente é **observável**: permite o conhecimento dos estados através dos sensores.
  3. O ambiente é **discreto**: permite a enumeração de vários estados.
  4. O ambiente é **determinístico**: as soluções são sequências de ações únicas e não existem acontecimentos inesperados.

Conteúdo

Tipos de problemas

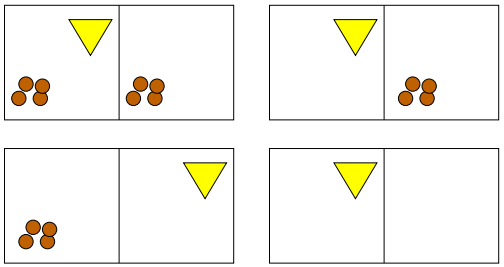
- Podemos dividir os problemas em dois tipos: os reais e os artificiais (toy).
- Os artificiais têm uma resolução simplificada dado que o seu contexto é normalmente mais abstracto que o dos problemas reais.
- Vamos ver agora alguns exemplos de cada um destes tipos de problema e como se faz a sua formulação em termos de IA.

Problemas artificiais

- Vamos ver de seguida os seguintes problemas:
  1. mundo do aspirador
  2. puzzle de 8 peças
  3. problemas das 8 rainhas

Mundo do aspirador

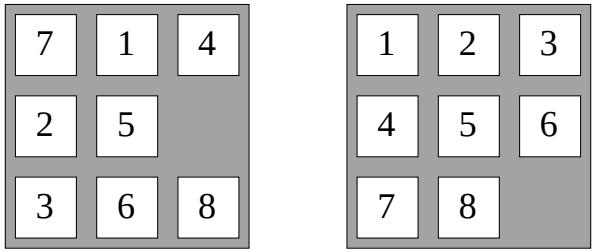
- Neste problema consideramos um mundo simples apenas com 2 posições (ou salas) que podem ou não ter pó e um agente que se pode deslocar de uma para a outra posição e aspirar o pó.
- Quatro exemplos de estados estão nas figuras abaixo onde o agente é representado pelo triângulo e o pó pelo grupo de pontos.



Mundo do aspirador

- Estados: cada uma das 2 salas pode ter ou não pó (4 possibilidades) e o agente pode estar em qualquer destas salas (2 possibilidades), logo temos um total de 8 estados possíveis.
- Estado inicial: qualquer estado pode ser escolhido como o inicial;
- Função sucessor: gera uma das seguintes ações: esquerda, direita ou aspirar;
- Teste do objetivo: verifica se todos as salas estão limpas;
- Custo do caminho: cada ação custa 1 logo o custo do caminho é o número de ações executadas.

Puzzle de 8 peças



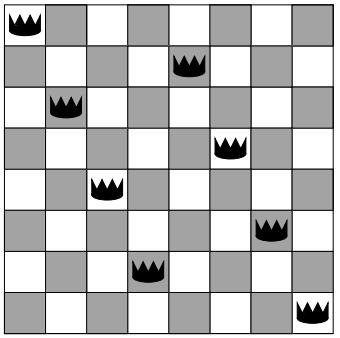
- Neste problema temos um tabuleiro com 3x3 posições, oito peças numeradas e um espaço vazio.
- As peças adjacentes ao espaço vazio podem deslocar-se para ele (também pode ser visto da forma complementar: o espaço movimenta-se para um local ocupado por uma peça).
- O objetivo é atingir um estado final, por exemplo, ordenar as peças como no exemplo da figura da direita.

Puzzle de 8 peças

- Estados: um estado tem de especificar a localização das 8 peças (a posição vazia fica especificada implicitamente).
- Estado inicial: qualquer estado pode ser o estado inicial, por exemplo, o da figura anterior do lado esquerdo.
- Função sucessor: especifica um movimento do espaço vazio para uma das casas adjacentes
- Teste do objetivo: verificar se foi atingido o estado desejado
- Custo do caminho: cada movimento duma peça custa 1 logo o custo do caminho é simplesmente o número de movimentos efectuados.

Problemas das 8 rainhas

- O objetivo deste problema é colocar 8 rainhas num tabuleiro de xadrez sem que nenhuma seja atacada.
  - Estados: qualquer arranjo de 0 a 8 rainhas no tabuleiro é um estado
  - Estado inicial: nenhuma rainha no tabuleiro
  - Função sucessor: adicionar uma rainha a uma posição vazia do tabuleiro
  - Teste do objetivo: 8 rainhas no tabuleiro e nenhuma sob ataque



Problemas reais

- Vamos ver de seguida os seguintes problemas:
  1. encontrar rotas
  2. problemas de visitas
  3. problema do caixeiro viajante (TSP: traveling salesperson problem)

Encontrar rotas

- O problema de **encontrar rotas** é muito frequente: encaminhamento de pacotes em redes de computadores, sistemas de planeamento de rotas de companhias aéreas, planeamento de operações militares, entre outros.
- Vejamos um exemplo simplificado do problema da especificação de rotas dum site de pesquisa de viagens aéreas:
  - Estados: cada estado representa uma localização (p.ex. um aeroporto) e a hora a que se está nessa localização;
  - Estado inicial: hora inicial e posição inicial;
  - Função sucessor: devolve os estados resultantes da aplicação de qualquer voo possível, a partir do aeroporto actual, após a hora actual;
  - Teste do objetivo: estamos no local desejado antes duma dada hora pré-definida?
  - Custo do caminho: depende do preço das viagens, do tempo de espera, do tempo de voo, tipo de avião, etc.

Problemas de visitas e TSP

- Estes problemas são parecidos com os de rotas: cada estado em vez de conter apenas uma localização contém a lista de todas as localizações visitadas até ao momento.
- A solução para estes problemas consiste na sequência de ações para que um dado grupo de locais seja visitado.
- O TSP é também um problema de visitas mas com uma restrição: cada local apenas pode ser visitado uma vez e queremos a rota mais curta.
- O problema TSP é também usado para planear o movimento de perfuradores de circuitos impressos e máquinas que arrumam caixas em armazéns.

Conteúdo

Pesquisa de soluções

- Tendo visto como fazer para definir um problema, devemos agora perceber como achar a solução.
- O **espaço de pesquisa** é um caso particular de um grafo: uma árvore.
- A raiz da árvore é o estado inicial.
- Devemos começar por testar se este estado é um estado objetivo.
- Não sendo um estado objetivo teremos de gerar outros possíveis estados até encontrarmos um. Para isso devemos **expandir** o estado inicial aplicando a função sucessor.
- Devemos continuar a expandir e a testar até encontrarmos o estado objetivo ou não existirem mais estados para expandir.
- A escolha de que estado deve ser expandido depende da **estratégia de pesquisa**.

Pesquisa de soluções

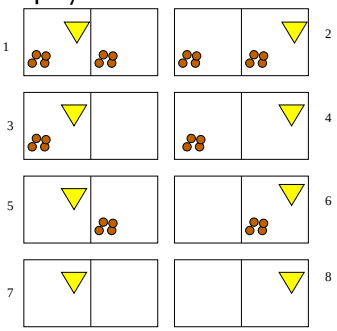
- É importante distinguir entre o **espaço de estados** e a **árvore de pesquisa**.
- Para o problema do aspirador só existem 8 estados possíveis, mas o número de nodos na árvore de pesquisa é infinito: por exemplo, o aspirador pode andar para esquerda e direita indefinidamente sem aspirar nada.
- Obviamente, um bom algoritmo de pesquisa irá evitar esses caminhos repetitivos.

Pesquisa de soluções

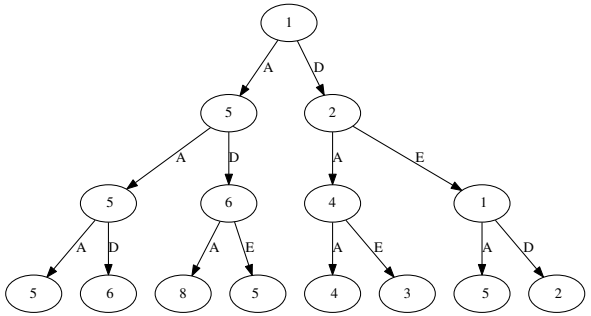
- É importante **não confundir um estado e um nodo**: um nodo é uma estrutura informática da árvore de pesquisa do problema.
- A cada nodo corresponde um estado no espaço de estados.
- Mas como já foi referido, **um dado estado pode ser representado por muitos nodos diferentes**, basta para isso que existam vários caminhos para chegar ao estado.

Pesquisa de soluções: exemplo

Espaço de estados:



- Estado inicial: 1
- Árvore de pesquisa parcial:



Medidas de desempenho

- Para avaliarmos a **qualidade dos métodos de pesquisa** vamos usar as seguintes medidas:
  - **completo**: se o algoritmo for sempre capaz de encontrar a solução, desde que ela exista, diz-se completo
  - **óptimo**: se o algoritmo for sempre capaz de achar a solução óptima (a que tem menor custo), diz-se óptimo
  - **complexidade espacial**: o espaço necessário em memória RAM para a execução do algoritmo
  - **complexidade temporal**: o tempo necessário para a execução do algoritmo

Conteúdo

Estratégias de pesquisa não informada

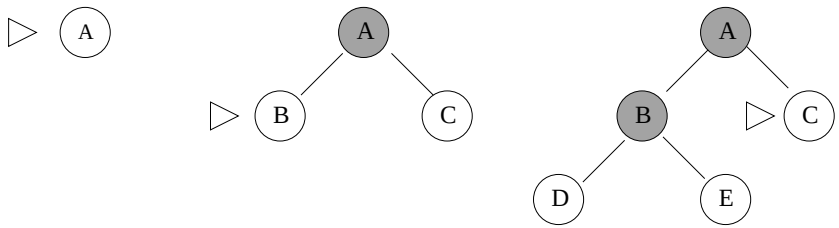
- As estratégias que iremos discutir nesta secção usam apenas a informação que é fornecida na definição do problema.
- O que estas estratégias fazem é gerar estados e verificar se são o estado objetivo.
- Todas as estratégias de pesquisa podem distinguir-se pela ordem de expansão dos nodos no grafo de estados.

Pesquisa primeiro em largura: PPL

- Nesta pesquisa primeiro expande-se o nodo raiz, depois todos os seus filhos, de seguida todos os netos e assim sucessivamente.
- Podemos resumir o processo dizendo que se expandem todos os nodos dum dado nível antes de prosseguir a expansão aos nodos do nível seguinte.
- Esta pesquisa é **completa** se o factor de ramificação for finito.
- Esta pesquisa é **óptima** quando o custo do caminho é uma função não decrescente da profundidade do nodo: por exemplo, todas as ações têm o mesmo custo.

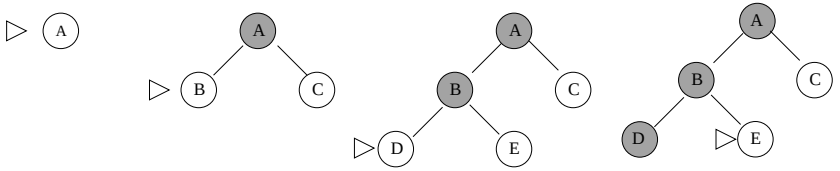
Pesquisa primeiro em largura: PPL

- Exemplo numa árvore binária: o símbolo ▷ indica o nodo a expandir, os nodos a escuro já foram expandidos e os restantes foram gerados mas não expandidos.



Pesquisa primeiro em profundidade: PPP

- Neste caso a expansão faz-se sempre ao nodo que se encontre a maior profundidade (quando estiverem todos a igual profundidade, faz-se a um qualquer).
- Quando se atinge um nodo folha, expande-se a partir do último nodo gerado que ainda não foi expandido.



Pesquisa com profundidade limitada: PPP-PL

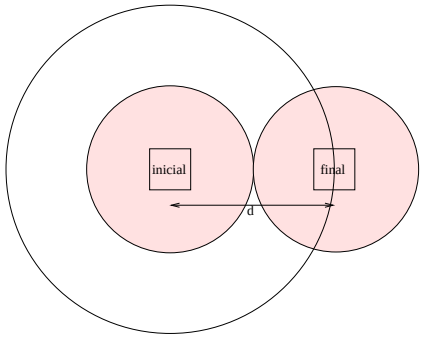
- Este caso a pesquisa é feita como na PPP com a diferença que só se atinge uma dada profundidade pré-definida na árvore de pesquisa.
- É uma boa solução quando temos árvores de pesquisa não equilibradas e podemos correr o risco de explorar profundidades muito grandes quando a solução se encontra a profundidades bastantes inferiores.

PPP com profundidade iterativa: PPP-PI

- Aqui temos outra variante da PPP, em que a profundidade máxima de pesquisa é variável.
- A variação da profundidade é feita gradualmente, começando por ser feita uma PPP até à profundidade 1; se não for encontrada a solução é feito nova PPP até à profundidade 2; e assim sucessivamente até se atingir o objetivo.
- Esta abordagem combina os benefícios da PPL com os da PPP:
  - tem requisitos de memória reduzidos ($O(bd)$) (como PPP)
  - é **completa** quando o factor de ramificação é finito (como PPL)
  - é **óptima** quando o custo do caminho é uma função não decrescente da profundidade do nodo: por exemplo, todas as ações têm o mesmo custo (como PPL)
- Em geral esta é a forma de pesquisa não informada mais indicada quando o espaço de pesquisa é grande e a profundidade da solução é desconhecida.

Pesquisa bidirecional: PB

- Neste caso são feitas duas pesquisas: uma com início no estado inicial e outra a começar pelo estado objetivo.
- A vantagem desta abordagem é óbvia quando olhamos para a figura abaixo: a área total de pesquisa quando consideramos os dois círculos correspondentes à pesquisa bidirecional é inferior à área quando consideramos apenas a pesquisa a partir do nodo inicial.



Pesquisa bidirecional

- Para efectuarmos a pesquisa bidirecional necessitamos de uma forma de pesquisar para trás: uma função predecessor $Pred(x)$ que nos devolve o estado anterior ao estado x.
- O problema é que nem sempre é fácil obter esta função.
- O algoritmo é **completo** se o factor de ramificação for finito e ambas as pesquisas forem em largura.
- O algoritmo **óptimo** apenas se os passos tiverem o mesmo custo e ambas as pesquisas forem em largura.

Pesquisas: resumo

Pesquisa	Óptima	Completa	Complex. espacial	Complex. temporal
PPL	S[1]	S[1]	$O(b^d)$	$O(b^d)$
PPP	N	N	$O(bm)$	$O(b^m)$
PPP-PL	N	N	$O(bp)$	$O(b^p)$
PPP-PI	S[1]	S[1]	$O(bd)$	$O(b^d)$
PB	S[1]	S[1]	$O(b^{d/2})$	$O(b^{d/2})$

b=factor de ramificação; m=profundidade da árvore de pesquisa; d=profundidade da solução menos profunda; p=limite profundidade; 1: ver as condições no acetato respectivo;

Conteúdo

Estratégias de pesquisa informada

- Já vimos que podemos usar pesquisa gerando sistematicamente novos estados e verificando se os mesmos correspondem ao objetivo.
- O problema desta abordagem é que é muitas vezes **pouco eficiente**.
- Iremos estudar agora estratégias de pesquisa que usam conhecimento específico do problema para permitir a descoberta de soluções de forma mais eficiente.
- As estratégias de **pesquisa informada** conseguem saber se um estado é melhor que outro.

Pesquisa melhor primeiro: PMP

- Nesta pesquisa o nodo a expandir é escolhido em função do valor dado por uma **função de avaliação** $f(n)$ que dá uma **estimativa do custo** associado ao nodo.
- Deste modo, é expandido primeiro o nodo com menor valor dado pela função de avaliação.
- Existem vários algoritmos de PMP dependendo da **função heurística** $h(n)$ que usam.
- A **função heurística**, $h(n)$, é uma componente da função de avaliação que **estima** o custo do caminho mais barato do nodo n até ao objetivo.
- Estas funções têm a seguinte restrição: $h(n) = 0$ se n for um nodo objetivo.

Pesquisa melhor primeiro gulosa (greedy): PMPG

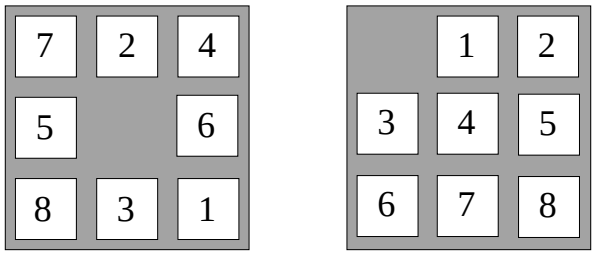
- Nesta pesquisa o nodo a expandir é o que estiver mais próximo do nodo objetivo.
- Isto quer dizer que a função de avaliação consiste apenas na função heurística: $f(n) = h(n)$.
- Esta pesquisa sofre dos mesmos problemas da PPP: não é óptima nem é completa (pode seguir um caminho infinito e nunca voltar para trás para experimentar outras hipóteses).
- A complexidade espacial e temporal é $O(b^m)$, onde m é a profundidade máxima do espaço de pesquisa.

Pesquisa A*

- Esta pesquisa (chamada A estrela) é a mais conhecida das PMP.
- A função de avaliação, $f(n)$, além da função heurística, $h(n)$, usa também o **custo do caminho** para chegar até ao nodo vindo do estado inicial, $g(n)$: $f(n) = g(n) + h(n)$.
- Se $h(n)$ satisfizer algumas condições, esta pesquisa é completa e óptima.
- Se $h(n)$ for uma **heurística admissível** - o que significa que $h(n)$ nunca sobrestima o custo de atingir o objetivo - A* é óptima (para pesquisa em árvores).
- Para um problema de achar um caminho num mapa, um exemplo duma heurística admissível seria o comprimento da distância em linha recta entre a posição actual e a objetivo: qualquer que seja o verdadeiro caminho da posição actual para a objetivo, será sempre maior que a distância em linha recta.

Conteúdo

Funções heurísticas



Estado inicial objetivo

- Vamos usar para exemplo o puzzle de 8 peças.
- A solução atinge-se em média com custo 22.
- O factor de ramificação é aproximadamente 3. Porquê?
- Assim, uma pesquisa exaustiva teria de procurar em $3^{22} \approx 3.1 \times 10^{10}$ estados.
- Se evitarmos estados repetidos, reduzimos o espaço de pesquisa para aproximadamente 2×10^5 estados.

Funções heurísticas

- Duas possíveis heurísticas:
  - h_1: número de peças fora do sítio em relação à solução. No caso da figura, $h_1 =$ ___.
  - h_2: soma das distâncias das peças em relação às suas posições finais. Usa-se a distância city block ou Manhattan: não há movimento diagonal. Para o caso da figura temos $h_2 =$ ___.

Leitura recomendada

- Russell e Norvig, cap. 3.