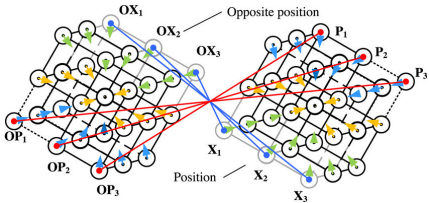
Resolver problemas mediante busqueda

Inteligencia Artificial



Marco Teran

2021 - Bogotá

Contenido

Agentes resolvente de problemas

Agentes resolvente de problemas

Forma sencilla de un agente general:

```
function SIMPLE-PROBLEM-SOLVING-AGENT(percept) returns an action
  static: seq, an action sequence, initially empty
          state, some description of the current world state
          goal, a goal, initially null
          problem, a problem formulation

  state ← UPDATE-STATE(state, percept)
  if seq is empty then
      goal ← FORMULATE-GOAL(state)
      problem ← FORMULATE-PROBLEM(state, goal)
      seq ← SEARCH(problem)
  action ← RECOMMENDATION(seq, state)
  seq ← REMAINDER(seq, state)
  return action
```

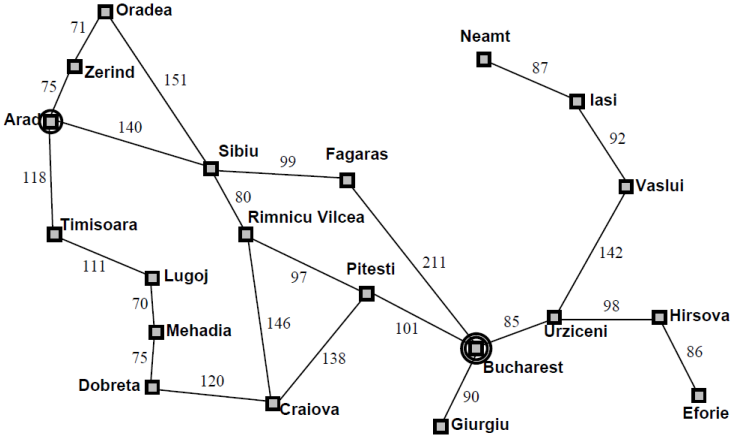
Nota: esto es una solución *offline* de problemas; solución ejecutada a "ojos cerrados." La resolución de problemas **en línea** implica actuar sin conocimiento completo.

Ejemplo: Rumania

De vacaciones en Rumanía: actualmente en Arad.
El vuelo sale mañana de Bucarest

1. **Formular el objetivo:**
   - llegar a Bucarest
2. **Formular el problema:**
   - **estados:** varias ciudades
   - **acciones:** carreteras entre ciudades
3. **Encontrar una solución:**
   - secuencia de ciudades, por ejemplo, *Arad, Sibiu, Fagaras, Bucarest*

Ejemplo: Rumania



Tipos de problemas

Tipos de problemas

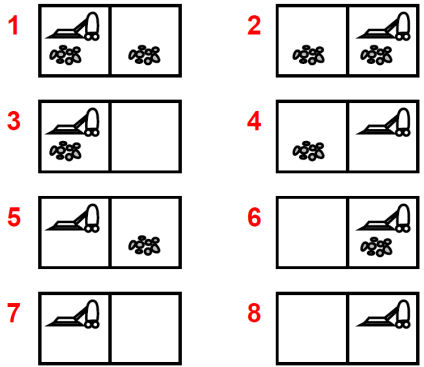
1. **Determinista, completamente observable** → problema de un solo estado
   - El agente sabe exactamente en qué estado estará; la solución es una secuencia
2. **No observable** → problema conforme
   - El agente puede no tener idea de dónde está; la solución (si la hay) es una secuencia
3. **No determinista y/o parcialmente observable** → problema de contingencia
   - percepts proporcionan **nueva** información sobre el estado actual solución es un plan contingente o una política búsqueda a menudo **interleave**, ejecución
4. **Espacio de estado desconocido** → problema de exploración ("online")

Ejemplo: el mundo de la aspiradora

Un solo estado, comienza en $\#5$. **¿Solución?**
$[Derecha, Aspirar]$

Conforme, comienza en $\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ por ejemplo, **Derecha** $\{2,4,6,8\}$. **¿Solución?**
$[Derecha, Aspirar, Izquierda, Aspirar]$

Contingencia, comienza en el $\#5$
Ley de Murphy: Aspirar puede ensuciar una alfombra limpia
Detección local: suciedad, sólo ubicación.
¿Solución?
$[Derecha,$ **si** $suciedad$ **entonces** $Aspirar]$



Formulación de problema bien definido

Formulación de problema bien definido

Un **problema** se define por cuatro elementos:

1. **Estado inicial**, p.ej., "en Arad"
2. **función sucesor** $S(x)$ = conjunto de pares de estado-acción por ejemplo, $S(Arad) = \{\langle Arad \rightarrow Zerind; Zerind\rangle, ...\}$
3. **test objetivo**, puede ser
   - *explícito*, por ejemplo, $x =$ "en Bucarest"
   - *implícito*, por ejemplo, $NoDirt(x)$
4. **costo del camino** (aditivo)
   - por ejemplo, suma de distancias, número de acciones ejecutadas, etc.
   - $c(x, a, y)$ es el costo escalonado, que se supone es ≥ 0

Una **solución** es una secuencia de acciones que lleva desde el estado inicial a un estado objetivo

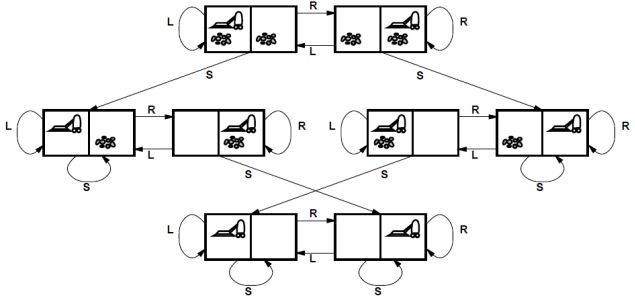
Selección de un espacio de estado

- El mundo real es absurdamente complejo
  - $\rightarrow$ espacio de estado debe ser abstraído para la resolución de problemas
- (Abstracto) estado = conjunto de estados reales
- (Abstracto) acción = combinación compleja de acciones reales
  - por ejemplo, *"Arad $\rightarrow$ Zerind"* representa un conjunto complejo de posibles rutas, desvíos, paradas de descanso, etc.
- Para la realizabilidad garantizada, cualquier estado real *"en Arad"*
  - debe llegar a algún estado real *"en Zerind"*
- (Abstracción) solución =
  - conjunto de caminos reales que son soluciones en el mundo real

¡Cada acción abstracta debería ser "más fácil" que el problema original!

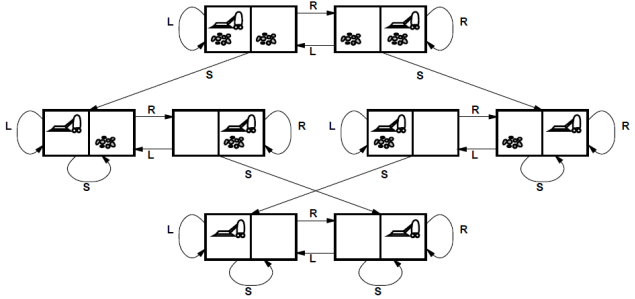
Ejemplo de problemas

Ejemplo: gráfo de espacio de estado mundial de la aspiradora



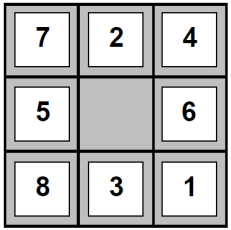
- ¿estados?
- ¿acciones?
- ¿test objetivo?
- ¿costo del camino?

Ejemplo: gráfo de espacio de estado mundial de la aspiradora

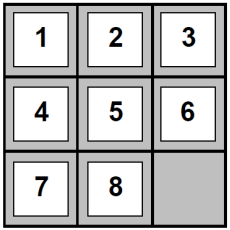


- **¿estados?** suciedad *discreta* y ubicaciones de robots (ignorar las cantidades de suciedad, etc.)
- **¿acciones?** Izquierda, derecha, aspirar, NoOp
- **¿test objetivo?** no hay suciedad
- **¿costo del camino?** 1 por acción (0 para NoOp)

Ejemplo: El rompecabezas de 8



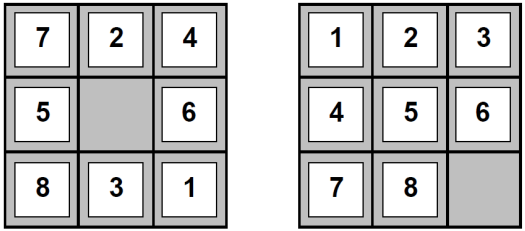
Start State



Goal State

- ¿estados?
- ¿acciones?
- ¿test objetivo?
- ¿costo del camino?

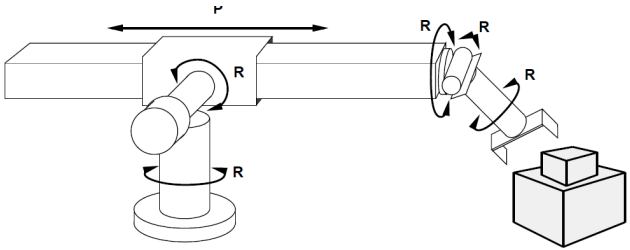
Ejemplo: El rompecabezas de 8



- **¿estados?** ubicaciones *discretas* de las fichas (ignorar posiciones intermedias)
- **¿acciones?** mover el blanco a la izquierda, derecha, arriba, abajo
- **¿test objetivo?** $=$ estado del objetivo (dado)
- **¿costo del camino?** 1 por movimiento

[Nota: solución óptima de la familia de n-Puzzle es $NP-hard$]

Ejemplo: ensamblaje robótico



- **¿estados?** coordenadas del valor real de ángulos robóticos conjuntos. Partes del objeto a montar
- **¿acciones?** movimientos continuos de articulaciones robóticas
- **¿test objetivo?** montaje completo sin robot incluido!
- **¿costo del camino?** tiempo de ejecución

Búsqueda de soluciones

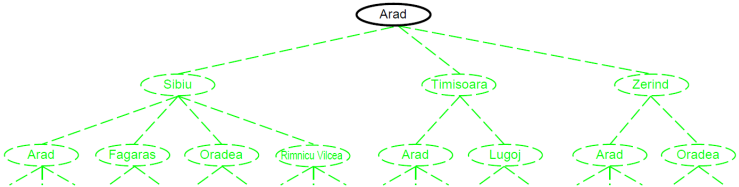
Árbol de búsqueda

Idea básica:

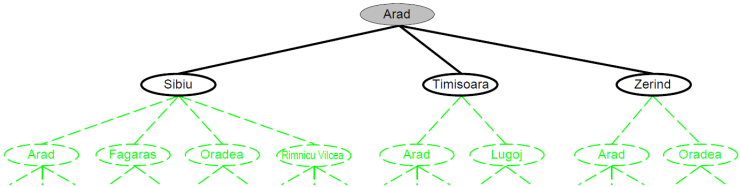
offline, exploración simulada del espacio de estado generando sucesores de Estados ya explorados (a.k.a. estados en expansión)

```
function TREE-SEARCH(problem, strategy) returns a solution, or failure
    initialize the search tree using the initial state of problem
    loop do
        if there are no candidates for expansion then return failure
        choose a leaf node for expansion according to strategy
        if the node contains a goal state then return the corresponding solution
        else expand the node and add the resulting nodes to the search tree
    end
```

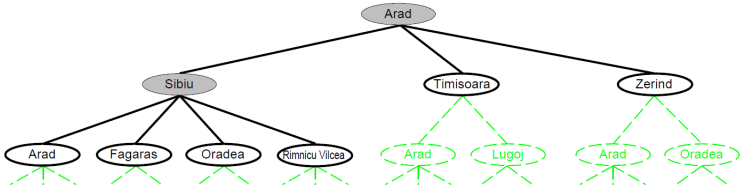
Ejemplo de búsqueda en árbol



Ejemplo de búsqueda en árbol

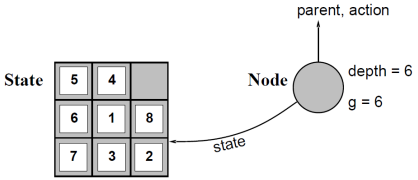


Ejemplo de búsqueda en árbol



Implementación: estados vs. nodos

- Un estado es una (representación de una) configuración física
- Un nodo es una estructura de datos que constituye parte de un árbol de búsqueda
  - incluye padre, hijos, profundidad, costo del camino $g(x)$
- ¡Los estados no tienen padres, hijos, profundidad, o costo de camino!



La función $Expand$ crea nuevos nodos, rellenando los diferentes campos y utilizando el $SuccessorFn$ del problema para crear los estados correspondientes.

Implementación: búsqueda general de árboles

```
function TREE-SEARCH( problem, fringe) returns a solution, or failure
  fringe ← INSERT(MAKE-NODE(INITIAL-STATE[problem]), fringe)
  loop do
    if fringe is empty then return failure
    node ← REMOVE-FRONT(fringe)
    if GOAL-TEST(problem, STATE(node)) then return node
    fringe ← INSERTALL(EXPAND(node, problem), fringe)
```

```
function EXPAND( node, problem) returns a set of nodes
  successors ← the empty set
  for each action, result in SUCCESSOR-FN(problem, STATE[node]) do
    s ← a new NODE
    PARENT-NODE[s] ← node;  ACTION[s] ← action;  STATE[s] ← result
    PATH-COST[s] ← PATH-COST[node] + STEP-COST(node, action, s)
    DEPTH[s] ← DEPTH[node] + 1
    add s to successors
  return successors
```

Medir el rendimiento de la resolución del problema

Medir el rendimiento de la resolución del problema

- Una estrategia se define seleccionando el orden de expansión del nodo
- Las estrategias se evalúan en las siguientes formas:
  1. **completitud:** ¿siempre garantizado que encuentra una solución si existe?
  2. **complejidad en tiempo:** cuánto tarda, número de nodos generados/expandidos
  3. **complejidad en espacio:** número máximo de nodos en memoria posibles
  4. **optimización:** ¿siempre encuentra una solución de menor costo?
- La complejidad del tiempo y del espacio se mide en términos de
  - b-factor máximo de ramificación del árbol de búsqueda
  - d-profundidad del nodo objetivo más superficial
  - m-longitud máxima de cualquier camino en el espacio de estado (puede ser ∞)

Estrategias de búsqueda

Estrategias de búsqueda no informadas

Estrategias no informadas utilizan sólo la información disponible en la definición del problema (búsquedas a ciegas) *(no heurísticas)*

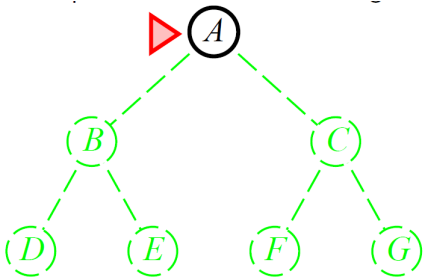
1. Búsqueda primero en anchura
2. Búsqueda de costo uniforme
3. Búsqueda primero en profundidad
4. Búsqueda de profundidad limitada
5. Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa

Búsqueda primero en anchura

Expandir el nodo poco profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* es una cola de FIFO, los nuevos sucesores van al final

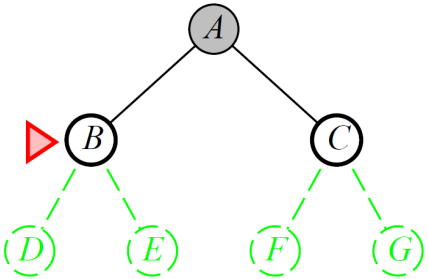


Búsqueda primero en anchura

Expandir el nodo poco profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* es una cola de FIFO, los nuevos sucesores van al final

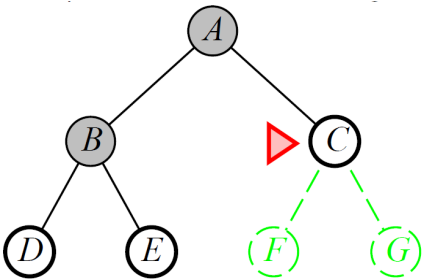


Búsqueda primero en anchura

Expandir el nodo poco profundo no expandido

Aplicación:

- es una cola de FIFO, los nuevos sucesores van al final

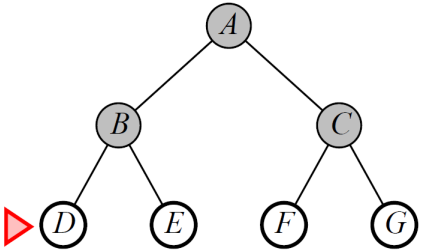


Búsqueda primero en anchura

Expandir el nodo poco profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* es una cola de FIFO, los nuevos sucesores van al final



Propiedades de la búsqueda primero en anchura

- **¿Completo?**
- **¿Tiempo?**
- **¿Espacio?**
- **¿Óptimo?**

El espacio es el gran problema; puede generar fácilmente nodos a 100MB/ seg por lo 24 horas = 8640GB.

Propiedades de la búsqueda primero en anchura

- **¿Completo?** Sí (si b es finito)
- **¿Tiempo?** $1+b+b^2+b^3+...+b^d+b(b^d-1)=O(b^{d+1})$, exp. en d
- **¿Espacio?** $O(b^{d+1})$ (mantiene cada nodo en memoria)
- **¿Óptimo?** Sí (si el costo $=1$ por paso); no es óptimo en general

El espacio es el gran problema; puede generar fácilmente nodos a 100MB/ seg por lo 24 horas $=$ 8640GB.

Búsqueda de costo uniforme

Expandir el nodo de menor costo no expandido
Aplicación:

- $estrategia =$ cola ordenada por coste del camino, primero expande el más bajo

Equivalente a búsqueda primero en anchura si todos los pasos cuestan igual

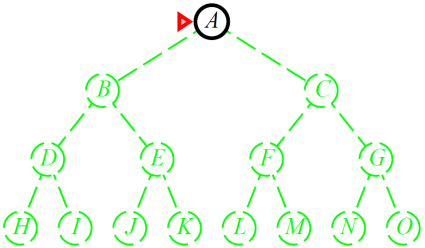
- **¿Completo?** Sí, si el costo del paso $\geq \epsilon$
- **¿Tiempo?** # de nodos con $\leq$ costo de solución óptima g, $O(b^{\lceil C*/\epsilon \rceil})$ donde $C*$ es el coste de la solución óptima
- **¿Espacio?** # de nodos con $\leq$ costo de solución óptima g, $O(b^{\lceil C*/\epsilon \rceil})$
- **¿Óptimo?** Sí - nodos expandidos en orden creciente de su función de costo $g(n)$

Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

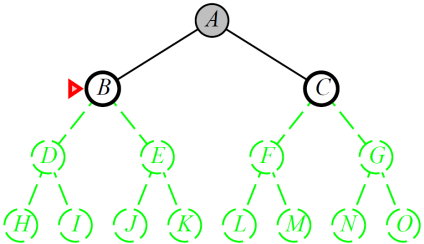


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

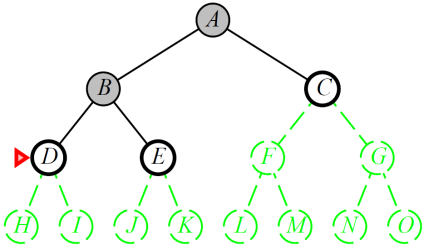


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

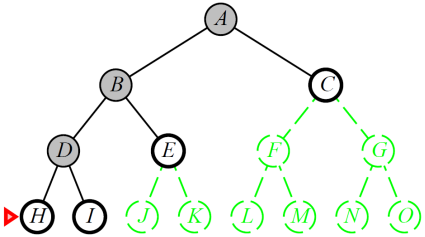


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

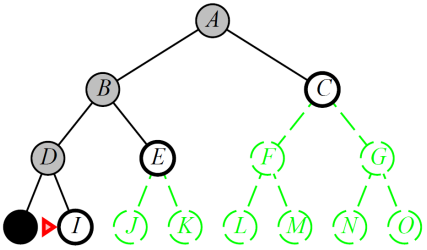


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

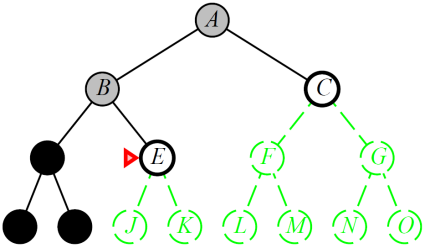


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

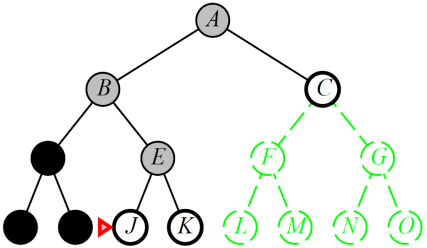


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

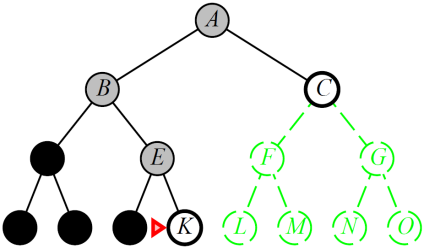


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

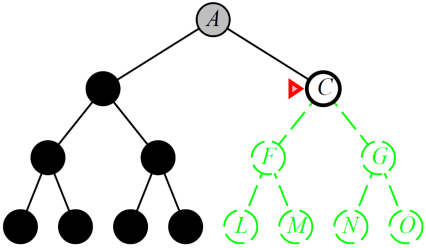


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

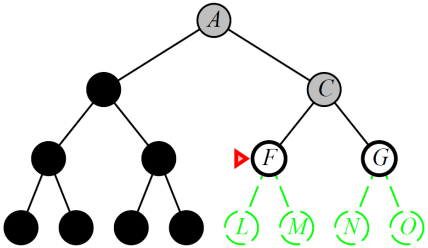


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

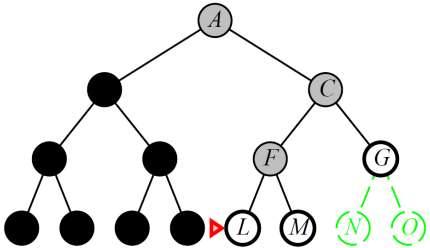


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante

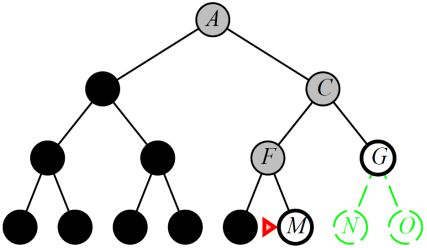


Búsqueda primero en profundidad

Expandir el nodo más profundo no expandido

Aplicación:

- *estrategia* = cola LIFO (Last in, first out), poner sucesores delante



Propiedades de la búsqueda de profundidad inicial

- **¿Completo?** *No:* falla en espacios de profundidad infinita y espacios con bucles. Modificar para evitar estados repetidos a lo largo de la ruta $\rightarrow$ completar en espacios finitos
- **¿Tiempo?** $O(b^m)$: terrible si m es mucho más grande que d, pero si las soluciones son densas, puede ser mucho más rápido que la búsqueda en anchura
- **¿Espacio?** $O(bm)$, es un espacio lineal
- **¿Óptimo?** *No*

Búsqueda de profundidad limitada

= búsqueda de profundidad inicial con límite de profundidad l, los nodos en la profundidad l no tienen sucesores

Aplicación recursiva:

```
function DEPTH-LIMITED-SEARCH( problem, limit) returns soln/fail/cutoff
  RECURSIVE-DLS(MAKE-NODE(INITIAL-STATE[problem]), problem, limit)

function RECURSIVE-DLS(node, problem, limit) returns soln/fail/cutoff
  cutoff-occurred? ← false
  if GOAL-TEST(problem, STATE[node]) then return node
  else if DEPTH[node] = limit then return cutoff
  else for each successor in EXPAND(node, problem) do
      result ← RECURSIVE-DLS(successor, problem, limit)
      if result = cutoff then cutoff-occurred? ← true
      else if result ≠ failure then return result
  if cutoff-occurred? then return cutoff else return failure
```

Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa

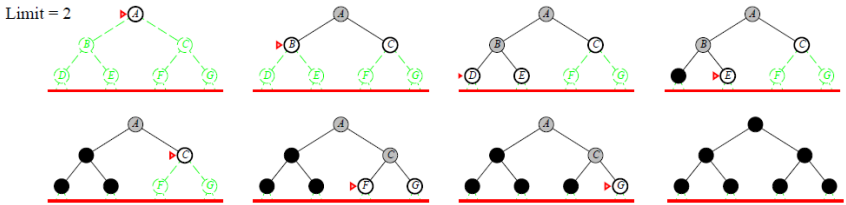
```
function ITERATIVE-DEEPENING-SEARCH( problem) returns a solution
    inputs: problem, a problem

    for depth ← 0 to ∞ do
        result ← DEPTH-LIMITED-SEARCH( problem, depth)
        if result ≠ cutoff then return result
    end
```

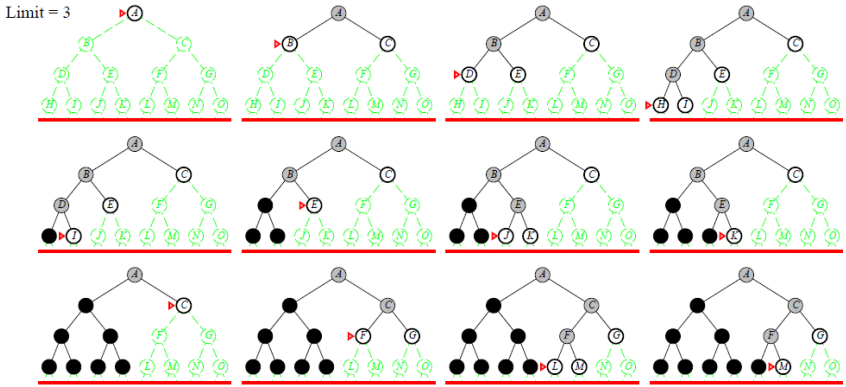
Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa $l = 0$

Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa $l = 1$

Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa $l = 2$



Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa $l = 3$



Propiedades de la búsqueda iterativa de profundización

- **¿Completo?** Sí
- **¿Tiempo?** $(d+1)b^0 + db^1 + (d-1)b^2 + ... + b^d = O(b^d)$
- **¿Espacio?** $O(bd)$
- **¿Óptimo?** Sí, si el costo del paso $= 1$. Se puede modificar para explorar el árbol de costo uniforme

Comparación numérica para $b = 10$ y $d = 5$, solución a la derecha:

$$N(BPI) = 50 + 400 + 3000 + 20000 + 100000 = 123450$$

$$N(BPA) = 10 + 100 + 1000 + 10000 + 100000 + 999990 = 1111100$$

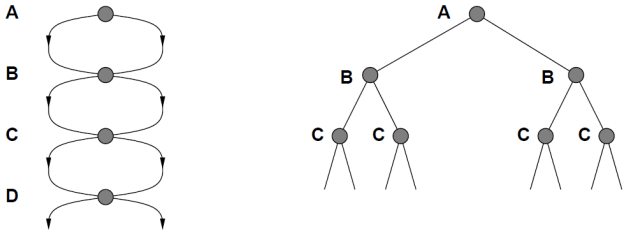
- IDS funciona mejor porque otros nodos en profundidad d no se expanden
- BFS se puede modificar para aplicar la prueba de objetivos cuando se **genera** un nodo

Resumen de los algoritmos

Criterio	Primero en anchura	Costo uniforme	Primero en profundidad	Profundidad limitada	Profundidad iterativa
¿Completo?	Sí*	Sí*	No	Sí, si $l \geq d$	Sí
Tiempo	b^{d+1}	$b^{\lceil C*/\epsilon \rceil}$	b^m	b^l	b^d
Espacio	b^{d+1}	$b^{\lceil C*/\epsilon \rceil}$	bm	bl	bd
¿Óptimo?	Sí*	Sí	No	No	Sí*

Evitar estados repetidos

¡Fallar en detectar estados repetidos se puede convertir un problema lineal en uno exponencial!



Búsqueda por gráfos

```
function GRAPH-SEARCH( problem, fringe) returns a solution, or failure
    closed ← an empty set
    fringe ← INSERT(MAKE-NODE(INITIAL-STATE[problem]), fringe)
    loop do
        if fringe is empty then return failure
        node ← REMOVE-FRONT(fringe)
        if GOAL-TEST(problem, STATE[node]) then return node
        if STATE[node] is not in closed then
            add STATE[node] to closed
            fringe ← INSERTALL(EXPAND(node, problem), fringe)
    end
```

Resumen

Resumen

- La formulación de problemas generalmente requiere abstraer detalles del mundo real para definir un espacio de estados que pueda explorarse de forma factible
- Existe una variedad de estrategias de búsqueda desinformada
- La búsqueda de profundización iterativa utiliza un espacio de memoria lineal y no más tiempo que otros algoritmos desinformados

Muchas gracias por su atención

¿Preguntas?

Contacto: Marco Teran
webpage: marcoteran.github.io/