

Grafos etiquetados

Algoritmos en grafos ponderados

- Existen muchas situaciones donde además del modelo de grafo, se requiere además asociar un peso/longitud a las aristas del grafo.
- Estos grafos se denominan grafos ponderados, grafos etiquetados.
- Importantes problemas prácticos se abordan por medio de grafos ponderados. Por ejemplo:
 - Encontrar los caminos más cortos en un grafo
 - Encontrar el árbol de cubrimiento mínimo

Grafos no dirigidos con pesos

<code>EdgeWeightedGraph(V)</code>	// Constructor
<code>int V()</code>	// Número de vértices
<code>int E()</code>	// Número de aristas
<code>void addEdge(Edge e)</code>	// Agregar una arista
<code>Iterable<Edge> adj(int v)</code>	// Aristas adyacentes a v
<code>int degree(int v)</code>	// Grado de un vértice

Implementación

<code>Edge(int v, int w, double w)</code>	// Constructor
<code>int either()</code>	// Uno de los vértices
<code>int other(int v)</code>	// El otro vértice
<code>double weight()</code>	// Peso de la arista

Implementación

Grafos dirigidos con pesos

<code>EdgeWeightedDigraph(V)</code>	<code>// Constructor</code>
<code>int V()</code>	<code>// Número de vértices</code>
<code>int E()</code>	<code>// Número de aristas</code>
<code>void addEdge(DirectedEdge e)</code>	<code>// Agregar una arista</code>
<code>Iterable<DirectedEdge> adj(int v)</code>	<code>// Aristas adyacentes a v</code>
<code>int outdegree(int v)</code>	<code>// Grado saliente de un vértice</code>
<code>int indegree(int v)</code>	<code>// Grado entrante a un vértice</code>

Implementación

<code>DirectedEdge(int v, int w, double w)</code>	<code>// Constructor</code>
<code>int from()</code>	<code>// Vértice origen de la arista</code>
<code>int to()</code>	<code>// Vértice destino de la arista</code>
<code>double weight()</code>	<code>// Peso de la arista</code>

Implementación

Caminos más cortos

- En un grafo dirigido con pesos positivos, interesa encontrar el camino más corto desde un origen s a un nodo destino t .
- Una de las soluciones más conocidas es el algoritmo de Dijkstra.
- Este algoritmo encuentra las rutas más cortas desde un vértice s a los demás nodos.

Algoritmo de Dijkstra (1)

- Se mantienen tres estructuras auxiliares:
 - `distTo[i]`: Longitud del camino más corto de s a i .
 - `edgeTo[i]` : Última arista en el camino de s a i . Inicializado en `null`.
 - `pq` : Cola de prioridad mínima con los vértices indexados en función de su distancia al origen. (Ver [IndexMinPQ](#)).

```
public class DijkstraSP {  
    private double[] distTo;  
    private DirectedEdge[] edgeTo;  
    private IndexMinPQ<Double> pq;  
  
    ...  
}
```

Sobre cola de prioridad indexada

IndexMinPQ

- MinPQ solo contiene llaves comparables.
- En dijkstra necesitamos los nodos ($n=0, \dots, V-1$) y sus respectivas distancias al origen, priorizados en función de la distancia al origen.
- Por ejemplo:

nodo	5	1	4	2	6
distancia	1.1	2.3	3.2	3.8	4.5

IndexMinPQ

- Similar a MinPQ, pero se mantienen 3 arreglos:

```
private int[] pq;    // índices de los nodos
private int[] qp;    // Posición en la cola del índice i
private Key[] keys;  // Las llaves (distancias en Dijkstra)
```

- Las operaciones se implementan considerando tanto los índices, como las llaves. La prioridad la determinan las llaves.

```
insert(int i, Key key)           // Insertar un par índice,llave
int minIndex()                   // El índice del menor par
Key minKey()                     // La menor llave
int delMin()                     // Borrar el menor par
Key keyOf(int i)                 // Llave correspondiente a un índice
void changeKey(int i, Key key)   // Cambiar una llave
void decreaseKey(int i, Key key) // Decrementar el valor de una llave
boolean contains(int i)          // Está el índice en la cola?
```


Algoritmo de Dijkstra (2)

- Inicialización
 - `distTo[i]` : Longitud de los caminos $s \rightarrow i$ inicialmente infinito.
 - `edgeTo[i]` : Inicialmente no se han identificado aristas en los caminos más cortos: `null`.
 - `pq` : El vértice origen `s`.

```
distTo = new double[G.V()];  
edgeTo = new DirectedEdge[G.V()];  
  
for (int v = 0; v < G.V(); v++)  
    distTo[v] = Double.POSITIVE_INFINITY;  
distTo[s] = 0.0;  
  
pq = new IndexMinPQ<Double>(G.V());  
pq.insert(s, distTo[s]);
```

Algoritmo de Dijkstra (3)

- Proceso de “relajación” de aristas:
 - Al considerar la arista $v \rightarrow w$, si la longitud del camino a w pasando por v es más corta:
 - actualizar la `distTo[w]` con la nueva distancia
 - actualizar la última arista hasta w con la arista $v \rightarrow w$.
 - actualizar la cola de prioridad acorde a la nueva distancia hasta w .

```
private void relax(DirectedEdge e) {  
    int v = e.from(), w = e.to();  
    if (distTo[w] > distTo[v] + e.weight()) {  
        distTo[w] = distTo[v] + e.weight();  
        edgeTo[w] = e;  
        if (pq.contains(w)) pq.decreaseKey(w, distTo[w]);  
        else  
            pq.insert(w, distTo[w]);  
    }  
}
```

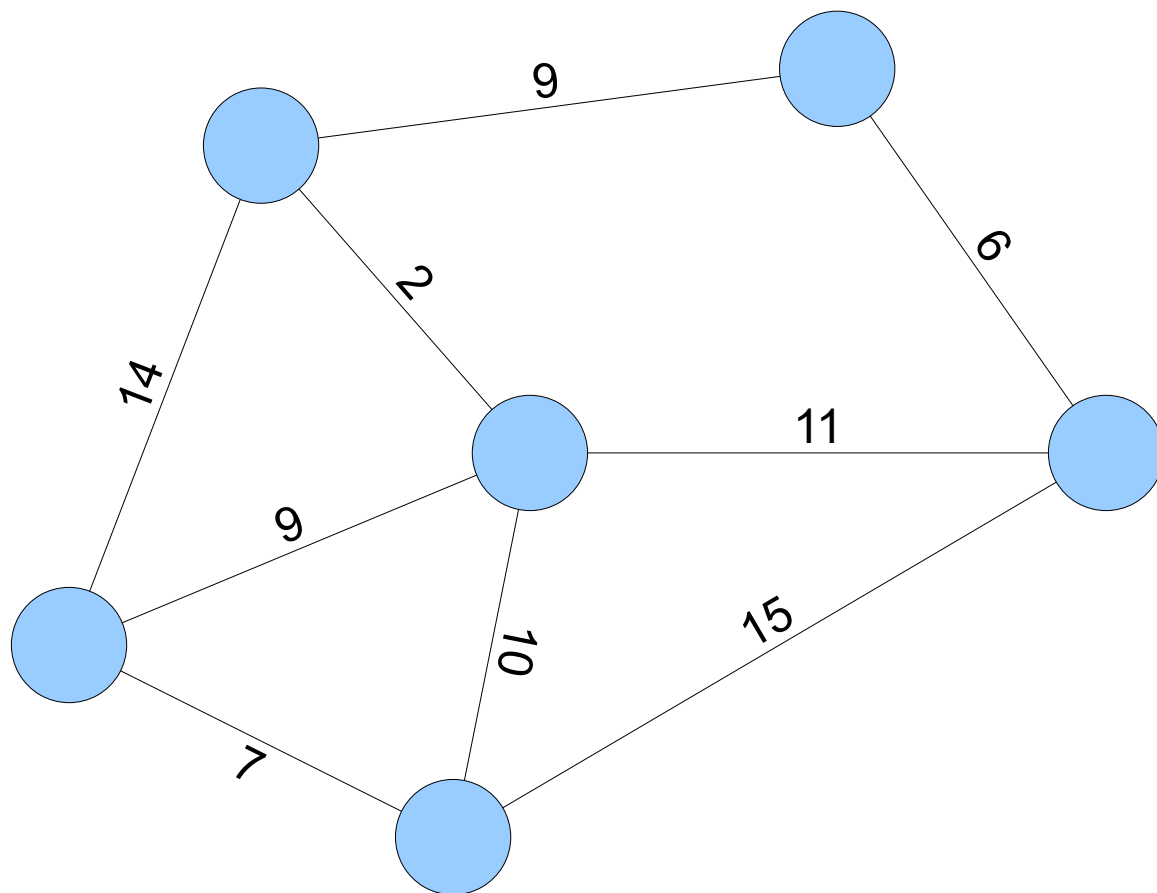
Algoritmo de Dijkstra (4)

- El ciclo central del algoritmo procede mientras la cola de prioridad no este vacía.
- Se obtiene el menor vértice de la cola y se relajan todas las aristas salientes de este vértice.

```
while (!pq.isEmpty()) {  
    int v = pq.delMin();  
    for (DirectedEdge e : G.adj(v))  
        relax(e);  
}
```

Implementación del algoritmo

Dijkstra: Caso ejemplo



Ejercicios

- Indicar el camino más corto del origen a cualquier nodo w :

```
void shortestPath(int w)
```

- Qué ocurre si el grafo no es conexo?

Eficiencia de Dijkstra

- La función `relax(Edge e)` realiza un número constante de operaciones aritméticas e invoca dos operaciones de la cola de prioridad:
 - `pq.contains(w)` : Que es de tiempo constante $\sim C$ y
 - `pq.decreaseKey(w, distTo[w])` o `pq.insert(w, distTo[w])`, que son ambas $\sim \lg(V)$.
- El tiempo total por invocación de `relax` es:
 $\sim \lg(V)$

Eficiencia de Dijkstra (2)

- El ciclo `while` principal realiza dos operaciones:
- `pq.delMin()` : Borra el menor elemento de la cola de prioridad, como máximo el número de vértices del grafo: $\sim V \lg(V)$.
- `relax(e)` para todas las aristas adyacentes, que totalizando sobre todas las iteraciones corresponden al número de aristas del grafo E , por lo que en total se tiene: $\sim E \lg(V)$.
- El tiempo total es:

$$\sim (V+E) \lg(V)$$

Consideraciones

- Si el grafo es denso, $E \sim kV^2$. En este caso el tiempo total tiene la forma:

$$\sim cV^2 \lg(V)$$

- En el caso de grafos no densos, que es bastante común en la práctica, se tiene $E \sim kV$ y por lo tanto el tiempo total es:

$$\sim cV \lg(V)$$

Ejercicio

- Se puede modificar Dijkstra para encontrar la “ruta más larga” ?
- Bajo que consideraciones sería valida la solución propuesta? Qué grafos pueden llevar a problemas?

Otro ejercicio

- Obtener el camino más corto entre todos los pares de nodos (v,w)

Solución del texto guía

El problema del agente viajero

Travelling Salesman Problem (TSP)

- Un agente viajero debe visitar N ciudades, cada ciudad una sola vez.
- El agente parte de una ciudad origen s y debe terminar en la misma ciudad: El recorrido es un ciclo.
- Las aristas representan las distancias entre ciudades.
- Se desea encontrar el recorrido de **menor distancia total**.

Características de TSP

- No se conoce ningún algoritmo exacto de tiempo polinómico.
- Tampoco se sabe si este algoritmo existe.
- Soluciones exactas conocidas requieren evaluar todos los posibles recorridos (todas las combinaciones de nodos). Llevan a tiempo exponencial.
- Es un problema de la clase **NP-Complete**: Problemas a los que no se les conoce solución de tiempo polinómico, pero que su solución es fácil de verificar.

Soluciones no exactas

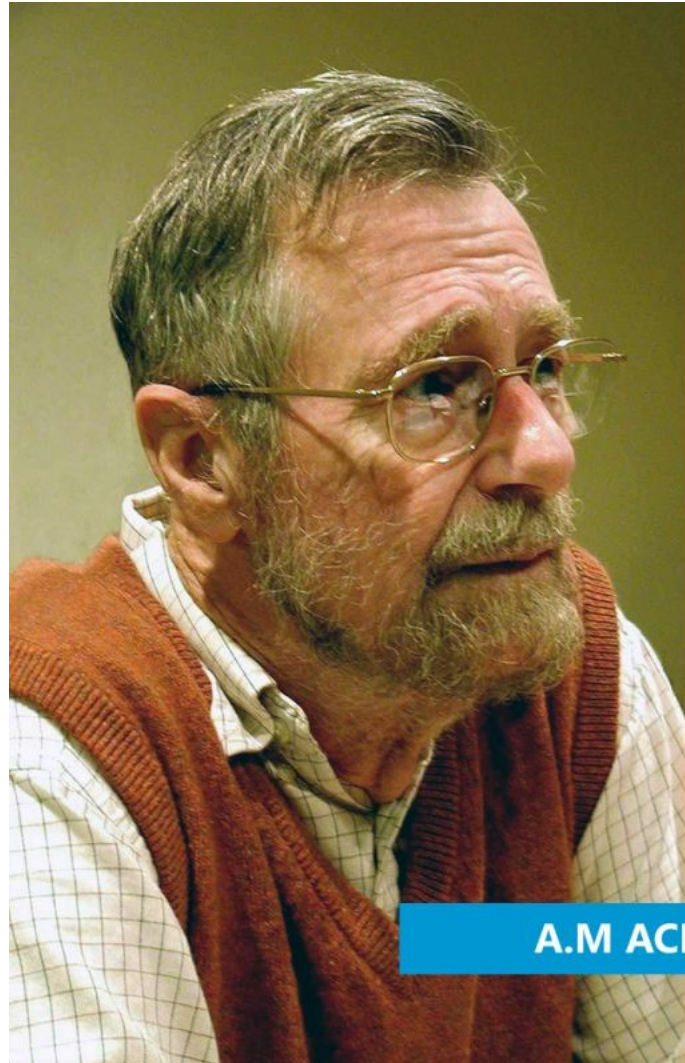
Para problemas de la familia NP-Complete, usualmente se adoptan dos tipos de solución

- 1) Solución aproximada: De tiempo polinómico, pero con un margen de error conocido.
- 2) Heurística: Soluciones “intuitivas” pero que no tienen ninguna garantía de optimalidad.

Anexos

Edsger Dijkstra

- Ganador premio Turing de la ACM
- Ver [nota biográfica](#)



50
acm

“Simplicity is a great virtue but it requires hard work to achieve it and education to appreciate it. And to make matters worse: complexity sells better.”

Edsger Dijkstra

A.M ACM Turing Laureate