

Note per la Lezione 27

Ugo Vaccaro

In questa lezione parleremo di problemi algoritmici relativi al calcolo di alberi ricoprenti di costo totale minimo in grafi. Per introdurre il problema, immaginiamo di avere n postazioni $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ e vogliamo costruire una rete di comunicazione su di essi, con i seguenti requisiti:

1. La rete deve essere connessa (cosicché sia possibile andare da ogni nodo ad ogni altro nodo)
2. Vogliamo spendere il meno possibile (assumiamo che stabilire una connessione tra due postazioni ci costi qualcosa)

È possibile stabilire una connessione tra alcune coppie (v_i, v_j) di locazioni (non è detto che sia possibile stabilire la connessione tra tutte le coppie), ad un costo pari a $c(v_i, v_j) \geq 0$.

Possiamo quindi rappresentare l'insieme delle possibili connessioni che potremmo realizzare mediante un grafo $G = (V, E)$ (dove i vertici rappresentano le locazioni e gli archi le connessioni che si possono stabilire tra connessioni). Inoltre, ciascun arco $e = (u, v)$ ha un costo $c(e) \geq 0$ ad esso associato.

Abbiamo quindi il seguente problema algoritmico: Minimo Sottografo Connesso Ricoprente.

Input al problema:

- Grafo $G = (V, E)$, costi $c(e) \geq 0$ per ogni arco $e \in E$

Output al problema: Sottoinsieme di archi $T \subseteq E$ tali che il sottografo (V, T) sia connesso ed il costo totale $\sum_{e \in T} c(e)$ sia il più piccolo possibile.

Fatto 1. Esiste una soluzione T di minimo costo al problema sopra esposto in cui (V, T) è un albero.

Proviamolo. Sia T una soluzione di minimo costo. Per definizione (V, T) è connesso. Se (V, T) è un albero siamo a posto. Se (V, T) non è un albero, allora contiene un ciclo C . Eliminando un qualsiasi arco (u, v) da C , il sottografo $(V, T' = T - \{(u, v)\})$ rimane connesso in quanto sarà sempre possibile andare da u a v seguendo la "via alternativa" che rimane del ciclo C . La soluzione T' in questo modo ottenuta ha un costo \leq del costo di T e, procedendo per via di eliminazione di cicli, otterremo alla fine un albero (V, \bar{T}) con costo di $\bar{T} \leq$ costo di T . Tutto ciò implica che anche \bar{T} è di costo minimo ma questa volta (V, \bar{T}) è *finalmente* un albero.

Quindi in realtà cerchiamo un Minimo *Albero* Ricoprente (MST). Tuttavia questo, almeno in linea di principio, *non* rende il problema più semplice. Infatti, il grafo completo K_n (in cui vi è un arco tra ogni coppia di nodi) possiede ben n^{n-2} distinti sottoalberi ricoprenti! (tra cui dovremmo cercarci quello di minimo costo).

Intuizione per un possibile algoritmo greedy. Siano e_1, e_2, \dots, e_m gli archi del grafo, ordinati in modo che $c(e_1) \leq c(e_2) \leq \dots \leq c(e_m)$

- Un'idea potrebbe essere quella di aggiungere all'insieme $T \subseteq E$ che vogliamo costruire (di minimo costo totale, ricordiamolo), uno ad uno gli archi e_i , iniziando da quello che costa meno (ovvero e_1) e proseguendo via via con quelli di peso maggiore.
- Se l'aggiunta di un arco e_i all'insieme attuale T crea un ciclo, non va bene. Scartiamo l'arco e_i e prendiamo in considerazione l'arco e_{i+1} , iterando il processo.
- Smettiamo di aggiungere archi a T quando abbiamo connesso tutti i vertici di V , ovvero quando (V, T) è un albero.

Vi potrebbe essere, tuttavia, un modo alternativo di procedere, in maniera analoga all'algoritmo di Dijkstra. Potremmo iniziare con un nodo radice s e tentare di costruire, in modo greedy, un albero con radice in s . Ad ogni passo attacchiamo all'albero corrente il nodo per cui ci costa meno farlo.

- Per fare ciò manteniamo ad ogni istante un insieme $S \subseteq V$ su cui un Minimo Albero Ricoprente T è stato costruito fin'ora. Inizialmente $S = \{s\}$.
- Ad ogni iterazione aumentiamo l'albero di un nodo, aggiungendo il nodo $v \notin S$ che minimizza il costo di tale aumento, pari a $\min_{e=(u,v):u \in S} c(e)$, ed includiamo l'arco $e = (u, v)$ che ottiene questo minimo all'albero corrente.
- Come prima, smettiamo di aggiungere archi a T quando abbiamo connesso tutti i vertici di V , ovvero quando (V, T) è un albero.

Quale dei due metodi funziona (ovvero produce un MST)? Entrambi, per fortuna. Il primo metodo porta all'*Algoritmo di Kruskal*,



il secondo all'*Algoritmo di Prim*.

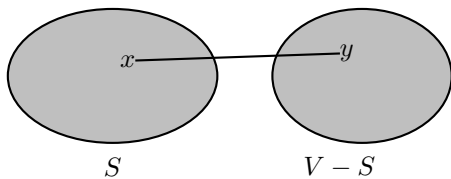


Per provare che i metodi prima esposti producono correttamente un MST, abbiamo bisogno di qualche risultato preliminare. Innanzitutto assumiamo (per il momento) che i costi degli archi siano tutti diversi tra di loro, poi vedremo come gestire la situazione nel caso in cui nel grafo vi sono anche archi di egual costo.

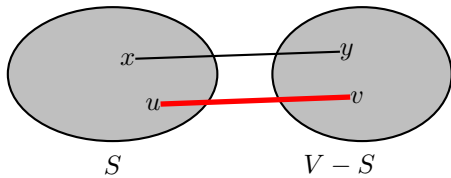
Primo risultato preliminare:

Sia $\emptyset \neq S \subset V$ un sottoinsieme dei nodi, e sia $e = (u, v)$ l'arco di *costo minimo* con un estremo $u \in S$ e l'altro $v \in V - S$. Allora *ogni* MST contiene l'arco e .

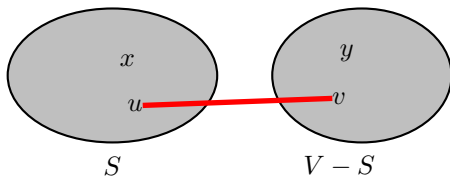
Per assurdo, supponiamo che ciò non sia vero, e sia T un MST che *non* contiene l'arco $e = (u, v)$. È ovvio che T dovrà contenere almeno un'arco $a = (x, y) \neq (u, v) = e$ con un'estremo $x \in S$ e l'altro in $y \in V - S$ (altrimenti come farebbe T a connettere tra di loro tutti i nodi di V ?)



Aggiungiamo a T l'arco $e = (u, v)$, (per ipotesi $c(u, v) < c(x, y)$). Che succede nell'albero T ? Ovviamente si crea un ciclo!



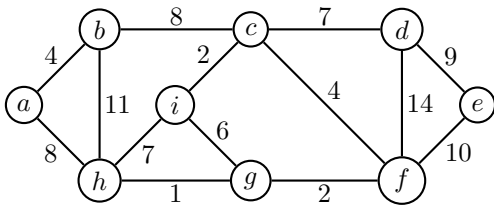
Eliminiamo allora l'arco (x, y) per ottenere la situazione seguente



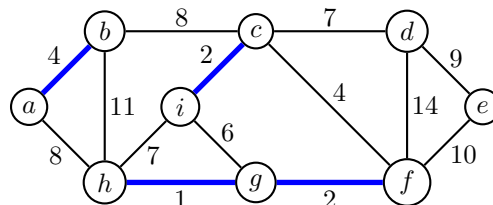
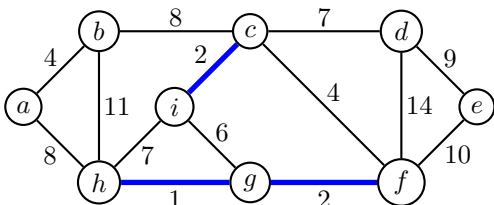
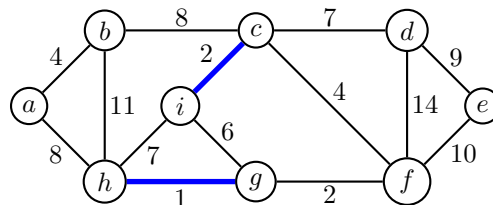
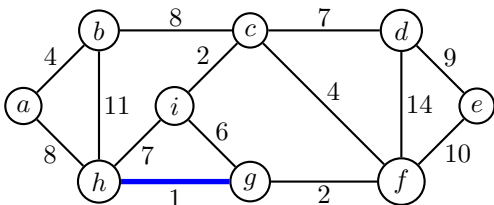
I nodi in S rimangono connessi tra di loro (l'eliminazione dell'arco (x, y) non influenza i cammini in S , analoga cosa per i nodi in $V - S$). Da ciò segue che ogni nodo di S è raggiungibile da ogni nodo di $V - S$, attraverso l'arco (u, v) (e viceversa). Quindi un nuovo albero T' che connette tutti i vertici di V , con $\text{costo}(T') = \text{costo}(T) - c(x, y) + c(u, v) < \text{costo}(T)$, contro l'ipotesi che T avesse costo minimo.

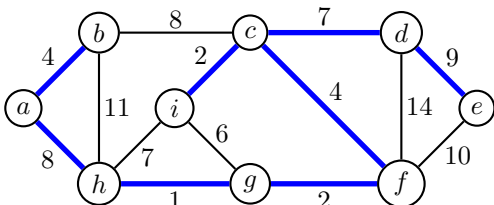
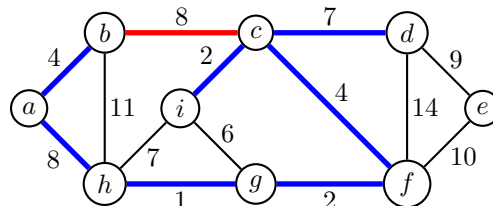
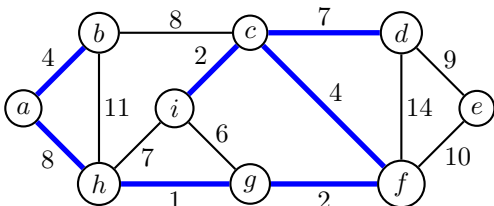
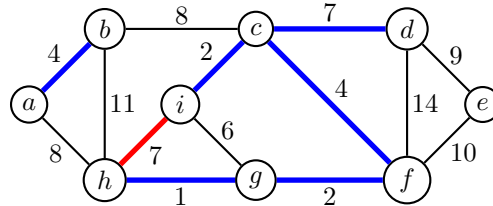
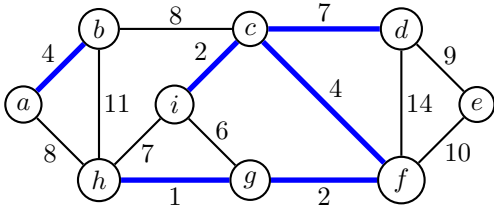
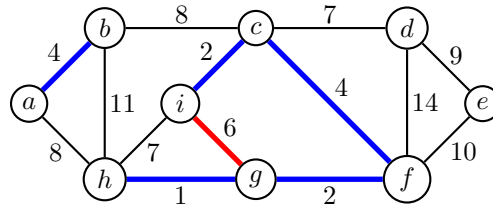
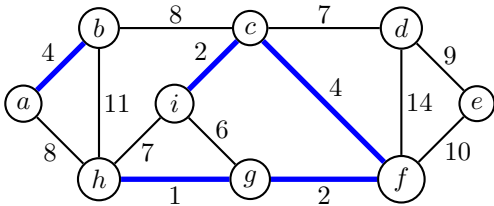
Vediamo un esempio di esecuzione dell'algoritmo di Kruskal sul grafo di seguito, in cui l'ordinamento degli archi, in base al loro costo é:

$(h, g), (i, c), (g, f), (a, b), (c, f), (i, g), (c, d), (i, h), (a, h), (b, c), (d, e), (b, h), (d, f)$



L'algoritmo esegue le seguenti scelte, passo passo, in cui rappresentiamo in blu gli archi considerati (ed aggiunti) ed in rosso quelli considerati ma non aggiunti in quanto creerebbero un ciclo.





Proviamo ora che l'algoritmo di Kruskal, che ricordiamo procede nel seguente modo,

Aggiungi a T uno ad uno gli archi del grafo, in ordine di costo crescente, saltando gli archi che creano cicli con gli archi già aggiunti.

produce effettivamente un MST. Sia $e = (v, w)$ un generico arco inserito in T dall'algoritmo di Kruskal, e sia S l'insieme di tutti i nodi connessi a v attraverso un cammino, al passo immediatamente precedente a quello in cui si aggiunge (v, w) a T . Ovviamente vale che $v \in S$, mentre $w \notin S$, altrimenti l'arco (v, w) creerebbe un ciclo. Inoltre, negli istanti precedenti l'algoritmo non ha incontrato nessun arco da nodi in S a nodi in $V - S$, altrimenti un tale arco sarebbe stato aggiunto, visto che non creava cicli. Pertanto l'arco (v, w) è il primo arco da S a $V - S$ che l'algoritmo incontra, ovvero è l'arco di minor costo da S a $V - S$ che, abbiamo visto, appartiene ad ogni MST.

Ci rimane da mostrare che l'output dell'algoritmo di Kruskal è un albero. Sicuramente, per costruzione, l'output (V, T) non contiene cicli. Potrebbe (V, T) non essere connesso? Ovvero potrebbe esistere un $\emptyset \neq S \subset V$ per cui in T non esiste alcun arco da S a $V - S$? Sicuramente no! Infatti, poichè il grafo G è connesso, un tale arco e esiste sicuramente in G e poichè l'algoritmo di Kruskal esamina *tutti* gli archi di G , prima o poi incontrerà tale arco e e lo inserirà, visto che non crea cicli.

L'algoritmo di Prim per la costruzione di uno MST procede in maniera differente.

- Inizialmente $S = \{s\}$, $T = \emptyset$.
- Ad ogni iterazione aumentiamo l'albero di un nodo, aggiungendo il nodo $v \notin S$ che *minimizza* il costo di tale aumento, pari a $\min_{e=(u,v):u \in S} c(e)$, ed includiamo l'arco $e = (u, v)$ che ottiene questo minimo all'albero corrente T .
- Terminiamo quando (V, T) è un albero (ovvero quando (V, T) è connesso).

Che l'algoritmo di Prim produca un albero è ovvio, visto che aggiunge archi solo da nodi già tra di loro connessi in S a nuovi nodi “fuori” di S (quindi non crea cicli). Inoltre, sempre per come l'algoritmo opera, ad ogni passo aggiunge a T l'arco di minimo costo che ha un estremo u in S (insieme dei nodi su cui un albero ricoprente parziale è stato già costruito) ad un nodo $v \in V - S$.

Dalla proprietà prima vista, tale arco appartiene ad ogni MST del grafo (cioè, di nuovo l'algoritmo non inserisce mai archi che non appartengono a MST, quindi produce effettivamente un MST).

Che succede se esistono archi di costo uguale? Non cambia nulla. Innanzitutto possiamo “perturbare” i costi degli archi di una piccola quantità in modo che i nuovi costi siano ora tutti diversi tra di loro, ed in modo che l'ordine relativo tra i costi degli archi rimanga *inalterato* rispetto a prima, cosicché i due algoritmi prima visti effettuino l'esame degli archi nello stesso ordine, (cioè sia nel caso in cui i costi siano uguali che nel nuovo caso in cui sono diversi). Inoltre, ogni albero T che è MST per i nuovi costi è MST anche per i vecchi costi. Infatti, se per assurdo esistesse un T^* per i vecchi costi per cui $\text{costo}(T^*) < \text{costo}(T)$, allora per una perturbazione sufficientemente piccola che trasforma i costi $c(u, v)$ degli archi in nuovi costi $c'(u, v)$ continuerebbe a valere $\text{costo}'(T^*) < \text{costo}'(T)$, contro l'ipotesi che T è un MST per i nuovi costi.

Implementazione dell'algoritmo di Prim per MST: L'implementazione è simile a quella dell'algoritmo di Dijkstra: occorre decidere quale nodo aggiungere all'albero T con nodi S che stiamo “crescendo”.

Per ogni nodo $v \in V - S$, manteniamo un valore $a(v) = \min_{e=(u,v):u \in S} c(e)$ che rappresenta il costo in cui incorriamo per aggiungere il nodo v all'albero, usando l'arco di minimo costo per tale aggiunta.

Manteniamo i nodi in una coda a priorità, organizzata in base ai valori $a(v)$; selezionamo un nodo con l'operazione **ExtractMin**, e effettuiamo l'aggiornamento dei valori $a(v)$ con l'operazione **DecreaseKey**.

Vediamo ora come implementare in maniera efficiente l'algoritmo di Prim per MST.

```

MST-PRIM( $G = (V, E), c, r$ )
1  $Q \leftarrow V$ 
2 For each  $u \in Q$ 
3    $a(u) \leftarrow \infty$ 
4  $a(r) \leftarrow 0$ ,  $\text{parent}(r) \leftarrow \text{NIL}$ 
6 While  $Q \neq \emptyset$ 
7    $u \leftarrow \text{ExtractMin}(Q)$ 
8   For each  $v \in \text{Adj}[u]$ 
9     If  $v \in Q$  and  $c(u, v) < a(v)$ 
10      Then  $\text{parent}(v) \leftarrow u$ 
11       $a(v) \leftarrow c(u, v)$ ; DecreaseKey( $Q, v, a(v)$ )

```

Le istruzioni di inizializzazione 1-3 prendono tempo $O(|V|)$. All'interno del **While** vengono esaminati (una sola volta!) tutti i vertici e gli archi incidenti su di essi. Vengono eseguite $|V|$ operazioni di **ExtractMin** (tempo $O(\log |V|)$ ciascuna se usiamo uno heap per implementare la coda a priorità), per un lavoro totale di $O(|V| \log |V|)$. Vengono eseguite $|E|$ operazioni di **DecreaseKey** (tempo $O(\log |V|)$ ciascuna) per un lavoro totale di $O(|E| \log |V|)$. Gran totale= $O(|E| \log |V|)$.

Cliccare qui per un esempio.