

Path Problems On Temporal Graphs

- [Astrazione](#)
- [1. Introduzione](#)
- [2. Notazione dei Grafi Temporali](#)
 - [2.1 Definizione di un grafo temporale](#)
 - [2.2 Insiemi di archi temporali](#)
 - [2.2.1 Uguaglianza di due archi temporali](#)
 - [2.2.2 Vicinato di un nodo](#)
- [3. Definizione dei Percorsi Temporali](#)
 - [3.1 Definizione formale dei Minimum Temporal Paths](#)
 - [3.2 Single-Source Minimum Temporal Paths \(SSMTP\)](#)
- [4. Algoritmi One-Pass per calcolare i Percorsi Temporali Minimi](#)
 - [4.1 Rappresentazione di un Grafo Temporale come Stream](#)
 - [4.2 Earliest-Arrival Paths](#)
 - [4.3 Latest-Departure Paths](#)
 - [4.4 Fastest Paths](#)
 - [4.4.2 Algoritmo One-Pass con Time Bound Migliore](#)
 - [4.4.2 Algoritmo Linear-Time per Casi Specifici](#)
 - [4.5 Shortest Paths](#)
- [5. Un approccio alla trasformazione di un grafo](#)
 - [5.1 Earliest-Arrival Paths](#)
 - [5.2 Latest-Departure Paths](#)
 - [5.3 Fastest Paths](#)
 - [5.4 Shortest Paths](#)
 - [5.5 Analisi della Complessità](#)
- [6. Applicazioni dei percorsi temporali](#)
 - [6.1 Temporal Closeness Centrality](#)
 - [6.2 Top-k Nearest Neighbors](#)

Astrazione

Lo **Shortest Path** è un problema fondamentale sui grafi.

Il concetto di shortest path classico è insufficiente, o addirittura imperfetto nei grafi temporali, dato che le informazioni temporali determinano l'ordine delle attività lungo qualsiasi percorso.

Calcolare questi **percorsi temporali** è impegnativo poiché i sottopercorsi di un percorso "corto" potrebbero non essere "corti" in un grafico temporale.

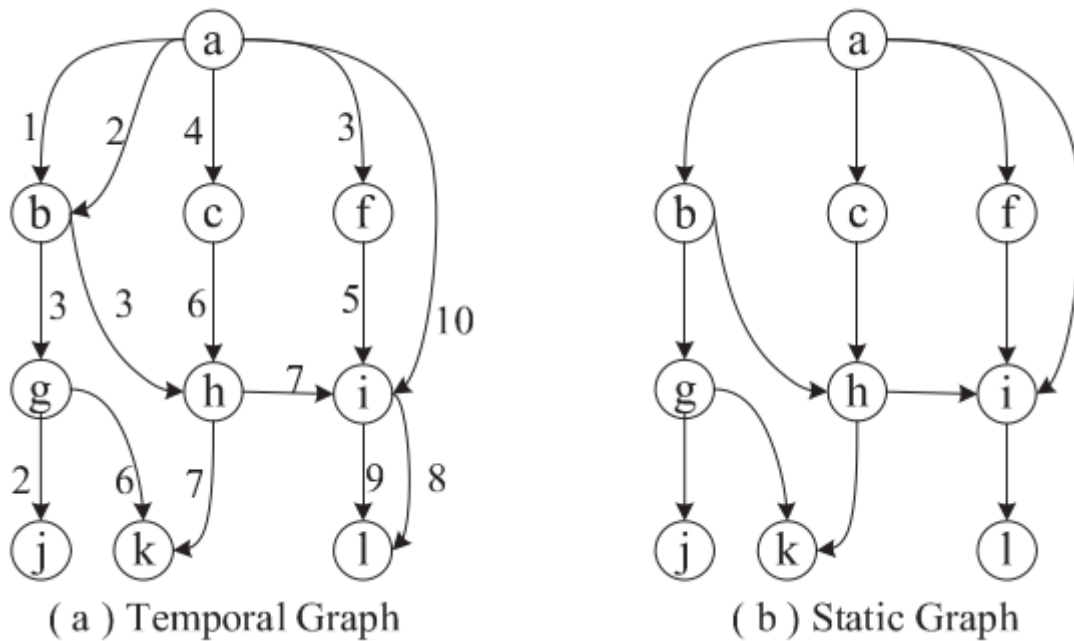


Figura 1

1. Introduzione

Molti grafi nel mondo reale sono **Grafi Temporali**, dove ogni vertice comunica con un'altro vertice ad un'istanza di tempo specifica.

Esempio :

Assumiamo che Figura 1(a) mostri un network di trasporto aereo, allora i due nodi a e b indicano che esiste un volo da a a b nel giorno 1 e nel giorno 2, infatti i numeri 1 e 2 sugli archi rappresentano il tempo di partenza dei voli.

Ci sono vari esempi di grafi temporali nella vita reale, come:

- Chiamate tra persone
- Social Network
- etc...

Ogni grafo temporale ha la sua versione *statica*, infatti i grafi temporali sono spesso condensati in quelli che si chiamano *grafi statici*, perchè questa versione è molto più semplice da gestire.

Esempio

Per calcolare le Componenti Fortemente Connesse (*SCCs*) di un grafo statico abbiamo un'algoritmo lineare, mentre per calcolare quelle di un grafo temporale **NON** esiste un'algoritmo polinomiale.

⚠ Osservazione >

Si può notare che alcuni percorsi nel grafo statico potrebbero non essere un percorso completo nel grafo temporale.

Per esempio, $\langle a, b, g, j \rangle$ è un percorso in Figura 1(b), ma $\langle a, b, g, j \rangle$ in Figura 1(a) è problematico perchè g ha solo un volo per j al giorno 2 ma non lo possiamo raggiungere prima del giorno 4.

L'esempio soora indica che un grafo statico condensato può presentare informazioni fuorvianti relative al grafo temporale originale, e quindi è essenziale mantenere le informazioni temporali nei grafi.

Esistono 4 tipi di percorsi temporali, che collettivamente si chiamano **Minimum temporal paths** (percorsi temporali minimi), dato che loro danno il valore minimo per differenti misure:

1. **earliest-arrival path** : percorso che fornisce l'earliest arrival time partendo da una sorgente x fino a un target y
2. **latest-departure path** : percorso che fornisce il latest departure time partendo da sorgente x fino a un target y entro un certo tempo
3. **fastest path** : il percorso attraverso il quale si va da x a y con il tempo trascorso minimo
4. **shortest path** : il percorso più breve da x a y in termini di tempo di attraversamento complessivo necessario sull'arco

⚠ Osservazione >

Notare che uno shortest path potrebbe non essere necessariamente un fastest path
 Notare anche che un fastest path potrebbe non essere un earliest-arrival path

Per calcolare questi percorsi non possiamo usare l'approccio Greedy che di norma viene usato nel calcolo dei percorsi per grafi statici, per esempio l'algoritmo di Dijkstra, perchè quelli sono basati sulla proprietà che un sottopercorso di uno shortest path è anch'esso uno shortest path, cosa non necessariamente vera quando calcoliamo uno dei 4 **Minimum temporal paths**.

2. Notazione dei Grafi Temporali

2.1 Definizione di un grafo temporale

Notazione di un grafo temporale

Sia $G = (V, E)$ un grafo temporale, con V denotiamo l'insieme dei nodi, e con E l'insieme degli archi.

Un'arco $e \in E$ è una **quadrupla** (u, v, t, λ) , dove:

- $u, v \in V$
- t è il **tempo di inizio (starting time)**
- λ è il **tempo di traversata (traversal time)** per andare da $u \rightarrow v$ partendo al tempo t
- $t + \lambda$ è il **tempo di fine**

Denotiamo lo starting time di e con $t(e)$ e il traversal time con $\lambda(e)$

Se gli archi non sono diretti, allora lo starting time e il traversal time di un arco sono gli stessi da $u \rightarrow v$ e da $v \rightarrow u$.

Vediamo alcuni esempi:

- **Chiamata o Sistema di Messaggistica** : ogni vertice rappresenta una persona, e un'arco (u, v, t, λ) indica che il vertice u comunica con v al tempo t , e il tempo di connessione è λ .
- **Social Network** : ogni vertice rappresenta una persona, e un'arco (u, v, t, λ) può essere un'interazione tra u e v al tempo t che prende tempo λ .

2.2 Insiemi di archi temporali

Denotiamo con $\Pi(u, v)$ l'insieme degli archi temporali da u verso v , mentre il numero di questi archi temporali è $\pi(u, v)$, infatti vale

$$\pi(u, v) = |\Pi(u, v)|$$

Definiamo anche il **massimo** numero di archi temporali da u a v , $\forall u, v \in V$, come

$$\pi = \max\{\pi(u, v) : (u, v) \in (V \times V)\}$$

Il valore di π può essere molto grande per molti grafi temporali reali.

2.2.1 Uguaglianza di due archi temporali

In un grafo temporale $G = (V, E)$, dati due archi temporali $e_1 = (u_1, v_1, t_1, \lambda_1) \in E, e_2 = (u_2, v_2, t_2, \lambda_2) \in E$, abbiamo che

$$e_1 = e_2 \iff (u_1 = u_2 \wedge v_1 = v_2 \wedge t_1 = t_2 \wedge \lambda_1 = \lambda_2)$$

Se noi condensiamo archi temporali in archi statici, otteniamo il corrispondente grafo statico, definito come $G_s = (V_s, E_s)$, dove $V_s = V$ e $E_s = (u, v) : (u, v, t, \lambda) \in E$.

Come possiamo notare, la condensazione **rimuove** tutte le informazioni temporali dagli archi di E e combina tutti gli archi che hanno stessi nodi di inizio e fine in un singolo arco.

2.2.2 Vicinato di un nodo

Definiamo il numero di vertici di G e G_s come $n = |V| = |V_s|$, e il numero di archi di G come $M = |E|$, mentre quelli di G_s sono $m = |E_s|$

Definiamo l'insieme dei **vicini-uscenti (out-neighbors)** di un vertice u in G o G_s come

$$\Gamma_{\text{out}}(u, G) = \Gamma_{\text{out}}(u, G_s) = \{v : (u, v, t, \lambda) \in E\} = \{v : (u, v) \in E_s\}$$

Definiamo il **grado-uscente (out-degree)** di un vertice u in G come

$$d_{\text{out}}(u, G) = \sum_{v \in \Gamma_{\text{out}}(u, G)} \pi(u, v)$$

e quello di u in G_s come

$$d_{\text{out}}(u, G_s) = |\Gamma_{\text{out}}(u, G_s)|$$

L'insieme dei **vicini-entranti (in-neighbors)** e il **grado-entrante (in-degree)** di un vertice u in G o G_s sono definiti in modo completamente simmetrico

$$\Gamma_{\text{in}}(u, G) = \Gamma_{\text{in}}(u, G_s) = \{v : (v, u, t, \lambda) \in E\} = \{v : (v, u) \in E_s\}$$

$$d_{\text{in}}(u, G) = \sum_{v \in \Gamma_{\text{in}}(u, G)} \pi(v, u)$$

$$d_{\text{in}}(u, G_s) = |\Gamma_{\text{in}}(u, G_s)|$$

3. Definizione dei Percorsi Temporal

Un **Percorso Temporale** P in un grafo temporale G è una sequenza di vertici

$$P = \langle v_1, v_2, \dots, v_k, v_{k+1} \rangle$$

dove $(v_i, v_{i+1}, t_i, \lambda_i) \in E$ è l' i -esimo arco temporale di P per $1 \leq i \leq k$, e $(t_i + \lambda_i) \leq t_{i+1}$ per $1 \leq i \leq k$.

Da notare che nell'ultimo arco $(v_k, v_{k+1}, t_k, \lambda_k)$ di P , non mettiamo la condizione su $(t_k + \lambda_k)$ dato che t_{k+1} non è definito per il percorso P .

Infatti, la quantità $(t_k + \lambda_k)$ è l'**ending time** di P , ed è definita come $\text{end}(P)$.

Definiamo anche lo **starting time** di P , definito come $\text{start}(P) = t_1$.

Definiamo poi **durata** e **distanza** di P , rispettivamente

$$\text{dura}(P) = \text{end}(P) - \text{start}(P)$$

$$\text{dist}(P) = \sum_{i=1}^k \lambda_i$$

Esempio

Un esempio di percorso temporale è $P = \langle (a, f, 3, 1), (f, i, 5, 1), (i, l, 8, 1) \rangle$ nel grafo temporale G in Figura 1(a).

Abbiamo :

- $start(P) = 1$
- $end(P) = 8 + 1 = 9$
- $dura(P) = 9 - 3 = 6$
- $dist(P) = 1 + 1 + 1 = 3$

3.1 Definizione formale dei Minimum Temporal Paths

🔗 Minimum Temporal Paths >

Dato un grafo temporale G , una sorgente x e un target y entrambi in G , e un intervallo di tempo $[t_\alpha, t_\omega]$, sia

$$\mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega]) = \{P : P \text{ è un percorso temporale da } x \rightarrow y \text{ dove } start(P) \geq t_\alpha \wedge end(P) \leq t_\omega\}$$

Definiamo i seguenti 4 tipi di percorsi temporali da $x \rightarrow y$ entro l'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$ che hanno il minimo valore per differenti misure, così collettivamente chiamati : **Minimum temporal paths** :

- **Earliest-arrival path** : $P \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])$ è un earliest-arrival path se

$$end(P) = \min\{end(P') : P' \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])\}$$

- **Latest-departure path** : $P \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])$ è un latest-departure path se

$$start(P) = \max\{start(P') : P' \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])\}$$

- **Fastest path** : $P \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])$ è un fastest path se

$$dura(P) = \min\{dura(P') : P' \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])\}$$

- **Shortest path** : $P \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])$ è uno shortest path se

$$dist(P) = \min\{dist(P') : P' \in \mathbb{P}(x, y, [t_\alpha, t_\omega])\}$$

Notare che se l'intervallo di tempo $[t_\alpha, t_\omega]$ non è esplicitamente specificato per i minimum temporal paths, allora viene semplicemente impostato come $[t_\alpha = 0, t_\omega = \infty]$.

Comunque, noi potremmo non essere sempre interessati all'intera storia temporale del grafo e quindi lasciare che l'utente specifichi l'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$, dando così più flessibilità ed applicabilità.

Una definizione più completa di minimum temporal paths è stata proposta qua. ^[1]

3.2 Single-Source Minimum Temporal Paths (SSMTP)

🔗 Definizione del problema >

Dato un grafo temporale $G = (V, E)$, un vertice $x \in V$, e un intervallo di tempo $[t_\alpha, t_\omega]$, il problema del **SSMTP** è quello di cercare :

1. l'**earliest-arrival path** da x ad ogni $v \in V$, oppure
2. il **latest-departure path** da ogni $v \in V$ ad x , oppure
3. il **fastest path** da x ad ogni $v \in V$, oppure
4. lo **shortest path** da x ad ogni $v \in V$
rispettivamente entro l'intervallo di cui sopra.

Sia P il **percorso temporale minimo** (minimum temporal path) ad essere calcolato. Per semplificare il tutto, nella presentazione dell'algoritmo per **SSMTP** vengono riportati solamente :

1. earliest-arrival time $end(P)$
2. latest-departure time $start(P)$
3. durata del fastest path $dura(P)$
4. distanza dello shortest path $dist(P)$

I seguenti **lemmi** danno alcune proprietà dei percorsi temporali minimi.

Lemma 1.

Un sottopercorso-prefisso di un earliest-arrival path potrebbe non essere un earliest-arrival path

Lemma 2.

Un sottopercorso-postfisso di un latest-departure path potrebbe non essere un latest-departure path

Lemma 3.

Un sottopercorso di un fastest path potrebbe non essere un fastest path

Lemma 4.

Un sottopercorso di uno shortest path potrebbe non essere uno shortest path

4. Algoritmi One-Pass per calcolare i Percorsi Temporali Minimi

4.1 Rappresentazione di un Grafo Temporale come Stream

La rappresentazione **edge stream** di un grafo temporale G è semplicemente una sequenza di tutti gli archi di G che arrivano nell'ordine in cui ciascun arco viene creato/collezionato (es. gli archi sono ordinati secondo il loro starting time).

Se due archi temporali sono creati/collezionati allo stesso momento, il loro ordine sarà arbitrario.

Esempio

Se G ha i seguenti archi, $\{(v_1, v_2, 2, 5), (v_2, v_4, 4, 1), (v_3, v_2, 1, 1)\}$, allora lo stream edge di G apparirà come : $\{(v_3, v_2, 1, 1), (v_1, v_2, 2, 5), (v_2, v_4, 4, 1)\}$

Lo stream edge è un formato naturale con cui viene generato e collezionato un grafo temporale.

Il seguente lemma mostra una proprietà di un percorso temporale in connessione con la rappresentazione **edge stream**.

Lemma 5.

Sia $P = \langle v_1, v_2, \dots, v_k, v_{k+1} \rangle$ un percorso temporale in G , dove $(v_i, v_{i+1}, t_i, \lambda_i) \in E$ è l' i -esimo arco temproale di P per $1 \leq i \leq k$. Per ogni e_i e e_j in P , se $i < j$ allora e_i viene prima di e_j nella rappresentazione edge stream di G .

Dimostrazione Lemma 5

Per definizione di percorso temporale, abbiamo che $t_i + \lambda_i \leq t_{i+1}$ per $1 \leq i \leq k$, e quindi $t_{i+1} > t_i$ come $\lambda_i > 0$. Quindi, gli starting times degli archi e_1, e_2, \dots, e_k sono strettamente in ordine ascendente, e quindi e_i viene prima di e_j nella rappresentazione edge stream di G . \square

4.2 Earliest-Arrival Paths

Algorithm 1: Computing earliest-arrival time

Input : A temporal graph $G = (V, E)$ in its edge stream representation, source vertex x , time interval $[t_\alpha, t_\omega]$

Output : The earliest-arrival time from x to every vertex $v \in V$ within $[t_\alpha, t_\omega]$

- 1 Initialize $t[x] = t_\alpha$, and $t[v] = \infty$ for all $v \in V \setminus \{x\}$;
- 2 **foreach** incoming edge $e = (u, v, t, \lambda)$ in the edge stream **do**
- 3 **if** $t + \lambda \leq t_\omega$ and $t \geq t[u]$ **then**
- 4 **if** $t + \lambda < t[v]$ **then**
- 5 $t[v] \leftarrow t + \lambda$;
- 6 **else if** $t \geq t_\omega$ **then**
- 7 Break the for-loop and go to Line 8;
- 8 **return** $t[v]$ for each $v \in V$;

Algoritmo 1

Il classico algoritmo di Dijkstra per calcolare il single-source shortest-path è basato sul fatto che un sottopercorso-prefisso di uno shortest path è anch'esso uno shortest path.

Comunque, accordandoci con il [Lemma 1](#), il sottopercorso-prefisso di un' earliest-arrival path è anch'esso un earliest-arrival path.

Questo sembra implicare che la strategia greedy per far crescere lo shortest-paths che è applicata nell'algoritmo di Dijkstra non può essere applicata per calcolare gli earliest-arrival paths, sebbene la seguente osservazione dimostri il contrario.

Lemma 6

Sia \mathbb{P} il set degli earliest-arrival paths da x a un vertice v_k nell'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$. Se $\mathbb{P} \neq \emptyset$, allora esiste $P = \langle X, v_1, \dots, v_k \rangle \in \mathbb{P}$ tale che ogni sottopercorso-prefisso $P_i = \langle x, v_1, \dots, v_i \rangle$ è un earliest-arrival path da x a v_i nell'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$, $1 \leq i \leq k$.

Dimostrazione lemma 6

Dato un qualunque earliest-arrival paths $P \in \mathbb{P}$, se nessuno dei suoi sottopercorsi-prefisso sono earliest-arrival path, noi possiamo sempre costruire un percorso \tilde{P} in questo modo. Attraversiamo P in ordine inverso e troviamo il primo vertice v_i tale che il sottopercorso-prefisso corrispondente P_i non è un earliest-arrival path da $x \rightarrow v_i$. Allora, deve esistere un'altro percorso \tilde{P}_i che è un earliest-arrival path da $x \rightarrow v_i$. Sostituiamo P_i con \tilde{P}_i in P . Il nuovo percorso \tilde{P} è comunque un percorso temporale valido perchè $end(\tilde{P}_i) < end(P_i)$. Inoltre, \tilde{P} è un earliest-arrival path da $x \rightarrow v_k$ perchè $end(\tilde{P}) = end(P)$.

Questo processo continua fino a quando ogni sottopercorso-prefisso è un earliest-arrival path e il risultante $\tilde{P} \in \mathbb{P}$, il che prova il lemma. \square

Basandoci sul [Lemma 6](#), possiamo applicare la strategia greedy per far crescere gli earliest-arrival paths in un modo simile all'algoritmo di Dijkstra.

Comunque, questo approccio necessita di una coda con priorità minima, risultando in un algoritmo che impiega tempo $O(m \log(\pi) + m \log(n))$ e spazio $O(M + n)$.

Comunque, per i grafi temporali, il [Lemma 5](#) implica che il grafo in input può essere nella sua rappresentazione edge stream, ed è possibile calcolare gli earliest-arrival paths con una sola scansione del grafo.

Usiamo un array $t[v]$ per tenere traccia degli earliest-arrival time da x verso ogni vertice $v \in V$ che è stato visto nello stream.

Come dice il [Lemma 5](#), se esiste un percorso temporale P da $x \rightarrow v$ tale che tutti gli archi in P sono stati visti nello stream, allora $t[v] = end(P) = t + \lambda$ come visto nel [Lemma 5](#).

La condizione $t + \lambda < t[v]$ in linea 4, si assicura che $t[v]$ sarà aggiornato con il più piccolo $end(P)$ per ogni P da $x \rightarrow v$ nell'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$.

Noi scannerizziamo il grafo G in tempo lineare e per ogni arco entrante $e = (u, v, t, \lambda)$ nello stream, controlliamo se e soddisfa il vincolo temporale di un percorso temporale all'interno dell'intervallo $[t_\alpha, t_\omega]$, per esempio, se $t + \lambda \leq t_\omega$ e $t \geq t[u]$.

Se sì, facciamo crescere il percorso temporale estendendolo a v usando l'arco e . Durante il processo, aggiorniamo $t[v]$ quando necessario come discusso prima. Il processo termina

quando incontriamo il primo arco nello stream che ha starting time $\geq t_w$ (Linee 6-7).

4.3 Latest-Departure Paths

4.4 Fastest Paths

4.4.2 Algoritmo One-Pass con Time Bound Migliore

4.4.2 Algoritmo Linear-Time per Casi Specifici

4.5 Shortest Paths

5. Un approccio alla trasformazione di un grafo

5.1 Earliest-Arrival Paths

5.2 Latest-Departure Paths

5.3 Fastest Paths

5.4 Shortest Paths

5.5 Analisi della Complessità

6. Applicazioni dei percorsi temporali

6.1 Temporal Closeness Centrality

6.2 Top-k Nearest Neighbors

-
1. B.-M. B. Xuan, A. Ferreira, and A. Jarry. Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks. *Int. J. Found. Comput. Sci.*, 14(2):267–285, 2003. ↩