

OTTIMIZZAZIONE COMBINATORIA

Prof. Marco Trubian
6 CFU

Luca Cappelletti

Lecture Notes
Year 2017/2018



Magistrale Informatica
Università di Milano
Italy
23 ottobre 2018

Indice

1	Introduzione	2
2	Matching Covers	3
2.1	Matching	3
2.2	Insieme stabile	3
2.3	Copertura	3
2.4	Disuguaglianze duali deboli	4
2.5	Teorema di Gallai	5
2.6	Cammino alternante e aumentante	6
2.7	Teorema del cammino aumentante	7
2.8	Teorema di König	7
2.9	Teorema di Hall o dei matrimoni	8
2.10	Formula di Tutte-Berge e Teorema di Tutte	8
2.10.1	Formula di Tutte-Berge	8
2.10.2	Teorema di Tutte	8
2.11	Proposizioni sugli alberi alternanti	9
2.12	Algoritmo Blossom	9
2.13	Il postino cinese (Chinese postman problem, CPP)	10

Introduzione

L' **Ottimizzazione combinatoria** propone modelli di soluzioni ad innumerevole problemi, tra i quali vi sono:

Matching covers Consideriamo due insiemi A e B , di cardinalità n : ad ogni coppia di valori del prodotto cartesiano dei due insiemi è associato un valore positivo che descrive la compatibilità tra i due valori. Si vanno a scegliere n coppie, senza che gli elementi vengano ripetuti, in modo da massimizzare la compatibilità totale.

Set Covering Data una *matrice binaria* ed un vettore di costi associati alle colonne si va a realizzare il sottoinsieme di costo minimo che copra tutte le righe.

Set Packing Data una *matrice binaria* ed un vettore di valori associati alle colonne, si cerca il sottoinsieme di colonne di valore massimo tali che non coprano entrambe una stessa riga.

Set Partitioning Data una *matrice binaria* ed un vettore di costi associati alle colonne, si cerca il sottoinsieme di colonne di costo minimo che copra tutte le righe senza conflitti.

Vertex Cover Dato un grafo non orientato $G = (V, E)$ si cerca il sottoinsieme di vertici di cardinalità minima tale che ogni lato del grafo vi incida.

Maximum Clique Problem Dato un grafo non orientato e una funzione peso definita sui vertici, si cerca il sottoinsieme di vertici fra loro adiacenti di peso massimo.

Maximum Independent Set Problem Dato un grafo non orientato e una funzione di peso definita sui vertici, si cerca il sottoinsieme di vertici fra loro non adiacenti di peso massimo.

Minimum Steiner Tree Dato un grafo non orientato e una funzione costo definita sui lati, si cerca un albero ricoprente di costo minimo.

Boolean satisfiability problem or SAT Data una forma normale congiunta (CNF), si cerca un assegnamento di verità alle variabili logiche che la soddisfi.

Versione pesata (MAX-SAT) Viene considerata anche una funzione peso associata alle formule che compongono la CNF. L'obiettivo è massimizzare il peso totale delle formule soddisfatte.

2

Matching Covers

2.1 Matching

Definizione 2.1.1 (Matching o Accoppiamento). Dato un grafo $G = (V, E)$, un **matching** è un sottoinsieme $M \subseteq E$ di archi *a due a due non adiacenti*.

Definizione 2.1.2 (Matching massimo). Matching M^* di cardinalità massima.

Definizione 2.1.3 (Matching ripartito). Se il grafo G è **bipartito**, allora anche M si dice **bipartito**.

Definizione 2.1.4 (Matching perfetto). Se la cardinalità del matching è pari a metà del numero di vertici, allora si dice **perfetto**:

$$|M| = \frac{|V|}{2}$$

Definizione 2.1.5 (Matching massimale). Un matching M si dice **massimale** se ogni elemento di $E \setminus M$ è adiacente ad almeno un elemento di M .

Un matching massimale **non** necessariamente è massimo, mentre un matching massimo è sempre massimale.

2.2 Insieme stabile

Definizione 2.2.1 (Insieme stabile o indipendente). Dato un grafo simmetrico $G = (V, E)$, un qualunque sottoinsieme S di vertici si dice **indipendente** o **stabile** se esso è costituito da elementi a due a due non adiacenti.

Definizione 2.2.2 (Insieme stabile massimo). Un insieme stabile S^* si dice **massimo** se $|S^*| \geq |S|$, per ogni insieme stabile S di G .

Definizione 2.2.3 (Insieme stabile massimale). Un insieme stabile S si dice **massimale** se ogni elemento di $V \setminus S$ è adiacente ad almeno un elemento di S .

2.3 Copertura

Definizione 2.3.1 (Copertura). Dato un grafo simmetrico $G = (V, E)$, un qualunque sottoinsieme T di vertici (F di archi) tale che ogni arco di E (vertice di V) incide su almeno un elemento di T (di F) si dice **copertura**. In particolare, l'insieme T è detto **trasversale** o **vertex cover** mentre l'insieme F è detto **edge cover**.

Definizione 2.3.2 (Copertura minima). Una copertura X^* si dice **minima** se $|X^*| \leq |X|$, per ogni insieme copertura X di G .

Definizione 2.3.3 (Copertura minimale). Una copertura X si dice **minimale** se $X \setminus \{x\}$ non è una copertura per ogni $x \in X$.

2.4 Disuguaglianze duali deboli

Teorema 2.4.1 (Disuguaglianze duali deboli). Indichiamo con $\alpha(G)$ l'**insieme stabile massimo** di G , con $\mu(G)$ il **matching massimo** di G , con $\rho(G)$ l'**edge cover minimo** di G e $\tau(G)$ **trasversale minimo** di G . Per un grafo G valgono le seguenti due disuguaglianze:

$$\alpha(G) \leq \rho(G)$$

$$\mu(G) \leq \tau(G)$$

Disuguaglianze duali deboli. Siano X l'**insieme stabile** di G e Y l'**edge cover** di G .

Poiché Y copre V , ogni elemento di X incide su almeno un elemento di Y .

D'altra parte, nessun elemento di Y copre contemporaneamente due elementi di X altrimenti i due elementi sarebbero adiacenti e quindi non potrebbero appartenere all'insieme stabile X .

Pertanto, per ogni $x \in X$ esiste un distinto $y \in Y$ che lo copre, e quindi $|X| \leq |Y|$.

Riscrivendo la precedente relazione per gli insiemi massimi X^* e Y^* si ottiene:

$$\alpha(G) \leq \rho(G)$$

Scambiando il ruolo di V ed E , si ottiene $\mu(G) \leq \tau(G)$. □

2.5 Teorema di Gallai

Teorema 2.5.1 (Teorema di Gallai). Per ogni grafo G con n nodi si ha:

$$\alpha(G) + \tau(G) = n$$

Se inoltre G non ha nodi isolati

$$\mu(G) + \rho(G) = n$$

Teorema di Gallai. **Iniziamo ottenendo la prima equazione:** Sia S un insieme stabile di G . Allora $V \setminus S$ è un insieme trasversale. In particolare, $|V \setminus S| \geq \tau(G)$. Se consideriamo l'insieme stabile massimo S^* , otteniamo:

$$\tau(G) \geq |V \setminus S^*| = n - \alpha(G)$$

da cui ricaviamo:

$$\alpha(G) + \tau(G) \leq n$$

Viceversa, sia T un insieme trasversale di G . Allora $V \setminus T$ è un insieme stabile.

In particolare, $|V \setminus T| \leq \alpha(G)$.

Se consideriamo l'insieme trasversale minimo T^* , otteniamo:

$$\alpha(G) \geq |V \setminus T^*| = n - \tau(G)$$

da cui ricaviamo

$$\alpha(G) + \tau(G) \geq n$$

Considerando la condizione ottenuta precedentemente possiamo concludere che:

$$\alpha(G) + \tau(G) = n$$

Procediamo a dimostrare la seconda equazione Sia G un grafo privo di nodi isolati e sia M^* il matching massimo di G . Indichiamo con V_{M^*} i nodi che sono estremi degli archi in M^* .

Sia H un insieme minimale di archi tale che ogni nodo in $V \setminus V_{M^*}$ è estremo di qualche arco in H .

Segue che:

$$|H| = |V \setminus V_{M^*}| = n - 2|M^*|$$

Osserviamo che l'insieme $C = H \cup M^*$ è un edge-cover di G .

Sicuramente, $|C| \geq \rho(G)$, quindi:

$$\rho(G) \leq |C| = |M^*| + |H| = |M^*| + n - 2|M^*| = n - |M^*| = n - \mu(G)$$

da cui ricaviamo:

$$\rho(G) + \mu(G) \leq n$$

Sia C il minimo edge-cover su G , cioè tale che $|C| = \rho(G)$ e sia $H = (V, C)$ il sottografo indotto da C . Valgono quindi le seguenti proprietà:

1. H è un grafo aciclico.
2. Ogni cammino di H è composto al più da due archi.

Dalle proprietà precedenti concludiamo che il grafo $H = (V, C)$ ha $|V| = n$ vertici e $|C| = \rho(G)$ archi. Può infine essere decomposto in N componenti connesse aventi la forma di stella.

Consideriamo l' i -esima componente connessa di H . Indichiamo con s_i il numero di nodi della componente connessa e con $s_i - 1$ il numero di archi della componente connessa. Pertanto:

$$n = \sum_{i=1}^N s_i \quad \text{e} \quad \rho(G) = \sum_{i=1}^N (s_i - 1) = n - N \Rightarrow N = n - \rho(G)$$

Sia M un matching con un arco per ogni componente di H . Si ottiene:

$$\mu(G) \geq |M| = n - \rho(G) \Rightarrow \rho(G) + \mu(G) \geq n$$

Considerando la condizione ottenuta precedentemente, possiamo concludere che:

$$\rho(G) + \mu(G) = n$$

□

2.6 Cammino alternante e aumentante

Sia M un matching di $G = (V, E)$.

Definizione 2.6.1 (Arco accoppiato). Un arco $(i, j) \in E$ si dice **accoppiato** se:

$$(i, j) \in M$$

Altrimenti è detto **libero**.

Definizione 2.6.2 (Vertice accoppiato). Un vertice $i \in V$ si dice **accoppiato** se su di esso incide un arco di M . Altrimenti si dice che **non incide**.

Definizione 2.6.3 (Cammino alternante). Un cammino P sul grafo G si dice **alternante** rispetto a M se esso è costituito alternativamente da archi accoppiati e liberi.

Definizione 2.6.4 (Cammino aumentante). Un cammino P *alternante* rispetto ad M che abbia entrambi gli estremi esposti si dice **aumentante**.

Teorema 2.6.5. Sia M un matching di G e sia P un cammino aumentante rispetto a M . La differenza simmetrica:

$$M' = (M \setminus P) \cup (P \setminus M)$$

È un matching di cardinalità $|M| + 1$.

Dimostrazione. Sia M un matching di G e sia P un cammino aumentante rispetto a M . L'insieme $M' = (M \setminus P) \cup (P \setminus M)$ gode delle seguenti proprietà:

1. M' è un matching:
 - (a) I nodi che non sono toccati da P non è cambiato nulla: su di essi incide un solo arco di M che ora appartiene anche ad M' .
 - (b) Sui nodi intermedi di P incide soltanto un arco di $P \setminus M$, e quindi di M' .
 - (c) I nodi estremi di P prima erano esposti e adesso sono accoppiati e su di essi incide soltanto un arco di $P \setminus M$.
2. M' ha un elemento in più di M :
 - (a) Sia $|M| = m_1 + m_2$ con $m_1 = |M \setminus P|$ ed $m_2 =$ numero di archi del matching appartenenti al cammino.
 - (b) Poiché P è aumentante, $|P| = m_2 + (m_2 + 1)$ dove $m_2 + 1 = |P \setminus M|$.
 - (c) $|M'| = |M \setminus P| + |P \setminus M| = m_1 + m_2 + 1 = |M| + 1$

□

Teorema 2.6.6 (Teorema di Berge). Un matching M di G è massimo **se e solo se** G non ammette cammini aumentanti rispetto a M .

Teorema di Berge. La condizione sufficiente segue dal teorema precedente. Per la condizione necessaria, facciamo vedere che, se non esistono cammini aumentanti rispetto a un certo matching M , allora quel matching M è massimo:

Supponiamo che G ammetta un matching M' con un elemento in più di M . Vogliamo dimostrare che allora esiste un cammino aumentante per M .

Consideriamo l'insieme di archi:

$$F = \{M' \cup M\} \setminus \{M' \cap M\}$$

e sia G' il sottografo di G avente gli stessi nodi di G ma contenente solo l'insieme di archi di F . Analizziamo il grado di ciascun nodo di G' , considerando tutti i casi possibili:

1. Un nodo su cui incide lo stesso arco appartenente sia ad M che ad M' è un nodo isolato su G' e quindi ha grado 0.
2. Un nodo su cui incide sia un arco di M sia un arco di M' è un nodo che ha grado 2 su G' .
3. Un nodo su cui incide un arco di M e nessun arco di M' o viceversa è un nodo che ha grado 1 su G' .
4. Un nodo esposto sia rispetto ad M che rispetto ad M' è un nodo isolato su G' e quindi ha grado 0.

Pertanto in G' nessun nodo ha un grado superiore a 2 e possiamo concludere che le componenti connesse di G' sono o nodi isolati o percorsi o cicli.

Nessun ciclo può essere dispari altrimenti ci sarebbero due archi dello stesso matching incidenti sullo stesso nodo e questo è impossibile.

Non possono essere tutti cicli pari altrimenti $|M| = |M'|$. Deve esistere una componente connessa che è un percorso.

Non tutti i percorsi possono essere pari altrimenti, nuovamente, $|M| = |M'|$.

Quindi, senza perdita di generalità, possiamo assumere che esista un percorso dispari che inizia e termina con un arco di M' .

Questo percorso è aumentante per M . □

2.7 Teorema del cammino aumentante

Teorema 2.7.1 (Teorema del cammino aumentante). Sia v un vertice esposto in un matching M . Se non esiste un cammino aumentante per M che parte da v , allora esiste un matching massimo avente v esposto.

Teorema del cammino aumentante. Sia M^* un matching massimo in cui v è accoppiato. Consideriamo $\{M^* \cup M\} \setminus \{M^* \cap M\}$: questo insieme non può contenere un cammino alternante con i vertici degli archi di M esposti, altrimenti sarebbe aumentante per esso.

Però deve contenere un cammino composto dallo stesso numero di archi dei due insiemi, M e M^* : un cammino con un solo arco di un insieme, infatti, sarebbe aumentante per l'altro e viceversa.

Consideriamo quindi un cammino P composto da un ugual numero di archi dai due insiemi e consideriamo un nuovo matching $M' = \{M^* \cup P\} \setminus \{M^* \cap P\}$. Vanno osservate due proprietà:

1. La cardinalità del nuovo insieme e del matching massimo sono uguali:

$$|M'| = |M^*|$$

2. Il nodo v è esposto rispetto ad M' .

Pertanto abbiamo individuato un nuovo matching massimo con v esposto. □

2.8 Teorema di König

Teorema 2.8.1 (Teorema di König). Se $G = (X, Y, E)$ è un grafo bipartito, allora $\mu(G) = \tau(G)$.

Teorema di König. Sia M^* un matching massimo, e siano:

1. X_1 un insieme dei nodi x di X **accoppiati** rispetto ad M^*
2. X_2 un insieme dei nodi x di X **esposti** rispetto ad M^*
3. Y_1 insieme dei nodi y di Y raggiungibili da x in X_2 . Questi nodi, per definizione, sono **accoppiati** altrimenti M^* non sarebbe massimo.
4. $Y_2 = Y \setminus Y_1$

Definizione 2.8.2 (Nodo raggiungibile). Un nodo $y \in Y$ è raggiungibile se esiste P alternante rispetto ad M^* da x in X_2 tale che l'ultimo arco non appartiene ad M^* .

Consideriamo un set di nodi Z definito come:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{\mu(G)}\} \quad \text{con} \quad \begin{cases} z_i = y_i & \text{se } y_i \text{ è raggiungibile} \\ z_i = x_i & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Procediamo ora a dimostrare che il set Z è trasversale.

Iniziamo dimostrando che non esistono archi da nodi in X_2 verso nodi in Y non coperti da Z :

1. Non può esistere un arco non coperto da Z tra un nodo in X_2 e un nodo in Y_2 , altrimenti il matching non sarebbe massimo.
2. Non può esistere un arco non coperto da Z tra un nodo in X_2 e un nodo in Y_1 perché i nodi in Y_1 sono raggiungibili e quindi l'arco necessariamente deve essere coperto.

Dimostriamo ora che non esistono archi da nodi in X_1 verso nodi in Y non coperti da Z :

Consideriamo un arco da X_1 a Y_2 : se non fosse coperto, allora esisterebbe un nodo, estremo dell'arco del matching, raggiungibile da X_2 in Y_2 . Ciò implicherebbe l'esistenza di un cammino aumentante ed il matching sarebbe pertanto non massimo.

Consideriamo ora un arco da X_1 a Y_1 : se il nodo terminale non fosse coperto non sarebbe raggiungibile (per la definizione di Y_1 e di Z) e non apparterebbe in primo luogo a Y_1 , quindi l'arco non esisterebbe.

Pertanto, Z è un insieme trasversale di cardinalità pari a $\mu(G)$. □

2.9 Teorema di Hall o dei matrimoni

Teorema 2.9.1 (Teorema di Hall). Sia $G = (V_1 \cup V_2, E)$ un grafo bipartito con $|V_1| \geq |V_2|$. Dato un insieme di vertici $J \subset V_2$, sia $\Gamma(J)$ il set dei vertici in V_1 che sono adiacenti a qualche vertice in J . Allora il grafo G ammette un **matching massimo** se e solo se:

$$|\Gamma(J)| \geq |J| \quad \forall J \subset V_2$$

Teorema di Hall. Sia M un **matching massimo** di G e J un sottoinsieme qualsiasi di V_2 . Sia $E(J)$ l'insieme dei lati contenuti nel matching M che sono incidenti con un vertice in J . Allora, i vertici terminali dei lati in $E(J)$ che sono contenuti in V_1 formano un sottoinsieme di cardinalità $|J|$ di $\Gamma(J)$.

Per assurdo, supponiamo che la condizione $|\Gamma(J)| \geq |J|$ è valida e che la cardinalità massima di un matching in G è minore di $|T|$. Allora per il **Teorema di König** è possibile costruire una **vertex cover** $X = V'_1 \cup V'_2$ dove $V'_1 \subset V_1$ e $V'_2 \subset V_2$ e $|S'| + |T'| < |T|$ ma quindi i vertici terminali u dei lati \overline{uv} , dove v è uno dei $|V_2| - |V'_2|$ vertici in $V_2 \setminus V'_2$ sono tutti contenuti in V_1 , quindi:

$$|\Gamma(V_2 \setminus V'_2)| \leq |V'_1| < |V_2| - |V'_2| = |V_2 \setminus V'_2|$$

da cui la contraddizione. □

2.10 Formula di Tutte-Berge e Teorema di Tutte

2.10.1 Formula di Tutte-Berge

Teorema 2.10.1 (Formula di Tutte-Berge). La dimensione di un matching massimo in un grafo $G = (V, E)$ è pari a:

$$\frac{1}{2} \min_{U \subseteq V} \{|U| - \text{odd}(G - U) + |V|\}$$

dove $\text{odd}(H)$ è il numero di componenti connesse del grafo H con un numero dispari di vertici.

Questa formula implica immediatamente una condizione per l'esistenza di un matching perfetto: il Teorema di Tutte.

2.10.2 Teorema di Tutte

Teorema 2.10.2 (Teorema di Tutte). Un grafo $G = (V, E)$ contiene un matching perfetto se e solo se per ogni sottoinsieme di nodi A vale che:

$$\text{odd}(G \setminus A) \leq |A|$$

2.11 Proposizioni sugli alberi alternanti

Definizione 2.11.1 (Albero alternante). Un albero alternante è costruito a partire da un matching M di un grafo $G = (V, E)$ ed un nodo $r \in V$ di M esposto.

Costruiamo iterativamente set di nodi A e B , in modo tale che ogni nodo A sia al termine di un cammino alternante di M di lunghezza dispari che inizia con r , mentre ogni nodo B al termine di quelli pari.

Tali insiemi possono essere costruiti iniziando da $A = \emptyset, B = \{r\}$ e seguendo la regola seguente:

$$vw \in E, v \in B, w \notin A \cup B, wz \in M \Rightarrow A' = A \cup \{w\}, B' = B \cup \{z\}$$

L'albero così costruito possiede due proprietà:

1. Ogni nodo dell'albero oltre alla radice è coperto da un lato di $M \cap E(T)$.
2. Per ogni nodo v dell'albero, il cammino nell'albero da v alla radice è alternante nel matching M associato all'albero.

Definizione 2.11.2 (Albero alternante frustrato). Un albero alternante in un grafo $G = (V, E)$ si dice frustrato se ogni lato di G avente un termine in $B(T)$ possiede l'altro termine in $A(T)$.

Proposizione 2.11.3 (Prima proposizione su AAF (5.6)). Sia $G = (V, E)$ un grafo con un matching M ed un albero alternante frustrato T associato ad esso. Allora G non possiede un matching perfetto.

Prima proposizione su AAF (5.6). Ogni elemento di $B(T)$ è una componente dispari a nodo singolo in $G \setminus A(T)$.

Siccome $|A(T)| < |B(T)|$, per il teorema di Tutte G non possiede nessun matching perfetto. □

Proposizione 2.11.4 (Seconda proposizione su AAF (5.7)). Sia $G = (V, E)$ un grafo bipartito, M un matching definito su G e T un albero M -alternante tale che nessun lato di G sia posto tra un nodo in $B(T)$ ed un nodo non in $V(T)$. Allora risulta che T è frustrato e di conseguenza G non ha un matching perfetto.

Seconda proposizione su AAF (5.7). Procediamo a mostrare che ogni lato avente un termine in $B(T)$ possiede l'altro termine in $A(T)$. Dalle ipotesi del teorema, l'unica possibile eccezione sarebbe un lato tra due nodi in $B(T)$. Ma questo lato, insieme con i lati che lo uniscono alla radice r , formerebbero un ciclo di lunghezza dispari, una cosa impossibile in un grafo bipartito.

Di conseguenza T è frustrato e quindi per la prima proposizione su AAF (5.6), il grafo G non possiede un matching perfetto. □

Definizione 2.11.5 (Pseudonodo). In riferimento ad un grafo G' ottenuto da G , vengono detti **pseudonodi** quei nodi che sono parte di G' ma non di G .

Proposizione 2.11.6 (Terza proposizione su AAF (5.8)). Sia G' un grafo derivato da G , sia M' un matching di G' e sia T un albero M' -alternante frustrato di G' tale che nessun elemento di $A(T)$ è uno pseudonodo.

Se T è frustrato, allora G non possiede un matching perfetto.

Terza proposizione su AAF (5.8). Se eliminiamo $A(T)$ da G otteniamo una componente con un insieme di nodi $S(v)$ per ogni nodo $v \in B(T)$. Utilizzando quindi la regola di Tutte-Berge si ha che:

$$\text{odd}(G \setminus A(T)) > |A(T)|$$

Ne Segue che G non possiede un matching perfetto. □

2.12 Algoritmo Blossom

L'algoritmo procede derivando grafi da un grafo bipartito G iniziale: se riesce ad identificare un matching perfetto in un grafo derivato allora è noto che esiste un matching perfetto in G e se riusciamo ad identificare un certo tipo di AAF all'interno di un grafo derivato possiamo concludere che G non possiede un matching perfetto. I grafi derivati G' vengono ottenuti identificando circuiti dispari

all'interno dell'albero alternante T ottenuto da G e rimuovendoli attraverso un procedimento detto di “shrinking” (questo tipo di circuito veniva chiamato blossom, da cui il nome dell'algoritmo.)

Teorema 2.12.1 (Algoritmo Blossom). L'algoritmo Blossom termina dopo $O(n)$ passi di “augmentations”, $O(n^2)$ passi di “shrinking” e $O(n^2)$ passi di estensione dell'albero. Inoltre, determina correttamente se il grafo G possiede un matching perfetto.

Algoritmo Blossom. L'algoritmo inizia con un matching qualsiasi $M = M'$ di G , che non cessa di essere tale per tutto il procedimento. Siccome ad ogni passo di “augmentation” il numero di nodi esposti decresce, vi saranno $O(n)$ passi di “augmentation”. Tra questi, ogni passo di “shrinking” riduce il numero dei nodi in G' senza tuttavia cambiare il numero dei nodi in T ed ogni passo di estensione dell'albero riduce il numero di nodi non in T non modificando il numero di nodi in G' .

Ne segue che il numero di passi di “shrinking” ed estensione dell'albero tra passi di “augmentation” è $O(n)$ e quindi in totale sono $O(n^2)$.

Infine, siccome ogni G' è un grafo derivato da G , se l'algoritmo termina con la conclusione che G' non possiede un matching perfetto, allora significa che ha trovato un albero con le proprietà descritte nella terza proposizione su AAF (5.8) e quindi G non possiede un matching perfetto. \square

2.13 Il postino cinese (Chinese postman problem, CPP)

Sia $G = (V, E)$ un grafo connesso e sia $w : E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ una lunghezza definita su G . Vogliamo trovare un percorso chiuso C di lunghezza minima $w(C)$ che contiene ogni lato di G almeno una volta.

Definizione 2.13.1 (Grafo e cammino euleriano). Un grafo è detto **euleriano** se è possibile tracciare un cammino che passa una sola volta per tutti gli archi del grafo. Un tale cammino è detto a sua volta euleriano.

Equivalentemente, un grafo G è euleriano se e solo se ogni vertice ha grado pari e un cammino euleriano può essere costruito con complessità $O(|E|)$.

Se il grafo G risulta euleriano allora la soluzione del CPP è banale: qualsiasi cammino euleriano andrebbe bene.

Altrimenti si procede come segue: sia X l'insieme di tutti i vertici di G con grado dispari. Aggiungiamo un insieme di lati E' a G tale che le seguenti tre condizioni siano soddisfatte:

1. Ogni lato $e' \in E'$ è parallelo a qualche lato $e \in E$. Estendiamo la distanza w a E' definendo $w(e') = w(e)$.
2. In V, E' , solo i vertici di X hanno grado dispari.
3. La distanza $w(E')$ è minima: $w(E') \leq w(E'')$ per ogni insieme E'' che soddisfa le due condizioni precedenti.

Ne segue che $(V, E \cup E')$ è un multigrafo euleriano, e ogni percorso euleriano introduce un cammino chiuso di lunghezza minima $w(E) + w(E')$ in G .