

COMPLEMENTI DI RICERCA OPERATIVA

Prof. Marco Trubian
6 CFU

Luca Cappelletti

Lecture Notes
Year 2017/2018



Magistrale Informatica
Università di Milano
Italy
25 aprile 2018

Indice

I	Programmazione non lineare	2
1	Alcune definizioni base	3
1.1	La convessità	3
1.2	Massimi e minimi locali	3
2	Ottimizzazione non vincolata	4
2.1	Condizioni necessarie di ottimalità del primo ordine	4
2.2	Condizioni necessarie di ottimalità del secondo ordine	4
2.3	Condizioni necessarie di ottimalità in senso stretto del secondo ordine	4
3	Programmazione quadratica	5
4	Convergenza	6
4.1	Algoritmo convergente localmente e globalmente	6
4.1.1	Convergente localmente	6
4.1.2	Convergente globalmente	6
4.2	Velocità di convergenza	6
4.2.1	Q-lineare	6
4.2.2	Q-superlineare	6
4.2.3	Q-quadratica	6
5	Metodi di ottimizzazione continua	7
5.1	Condizioni di Wolfe	7
5.2	Metodo di Armijo per stabilire la stepsize	7
5.3	Convergenza dei metodi di ricerca lineare approssimata	7
6	Metodi di ottimizzazione	9
6.1	Metodi a discesa rapida	9
6.2	Metodi Newton	9
6.2.1	Metodi Newton modificati	10
6.3	Metodi Quasi-Newton	10
6.4	Metodi del gradiente coniugato	10
6.5	Metodi Trust Region	11
6.5.1	Metodo zampa di cane	12
6.5.2	Proprietà della matrice B	12
II	Programmazione lineare intera	13
7	Programmazione lineare intera	14

Parte I

Programmazione non lineare

Alcune definizioni base

1.1 La convessità

Definizione 1.1.1 (Insieme convesso). Un insieme $X \subset \mathbb{R}^n$ è convesso se comunque presi due punti $\underline{x}, \underline{y} \in X$, allora $\lambda \underline{x} + (1 - \lambda) \underline{y} \in X$, per ogni $\lambda \in [0, 1]$.

La proprietà di convessità è invariante rispetto alle operazioni di moltiplicazione con uno scalare, unione e intersezione con un altro insieme convesso.

Definizione 1.1.2 (Funzione convessa). Una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ è convessa se il suo dominio è un insieme convesso $X \subseteq \mathbb{R}^n$ e comunque presi due punti $\underline{x}, \underline{y} \in X$ vale la relazione:

$$f(\lambda \underline{x} + (1 - \lambda) \underline{y}) \leq \lambda f(\underline{x}) + (1 - \lambda) f(\underline{y}) \quad \forall \lambda \in [0, 1]$$

La proprietà di convessità è invariante rispetto a moltiplicazione con uno scalare e somma tra funzioni convesse.

Vale inoltre che la funzione max di una o più funzioni convesse e che il luogo dei punti \underline{x} per i quali vale che $f(\underline{x}) \leq \alpha$ è convesso.

Definizione 1.1.3 (Problema convesso). Un problema di ottimizzazione con funzione obiettivo e regione ammissibile entrambe convesse viene detto problema convesso.

1.2 Massimi e minimi locali

Definizione 1.2.1 (Minimo globale). Un punto $\underline{x}^* \in X$ è un punto di minimo globale di $f(\underline{x})$ se:

$$f(\underline{x}^*) \leq f(\underline{x}) \quad \forall \underline{x} \in X$$

Definizione 1.2.2 (Minimo locale). Un punto $\underline{x}^* \in X$ è un punto di minimo locale di $f(\underline{x})$ se esiste un intorno aperto $I(\underline{x}^*, \epsilon)$ di \underline{x}^* avente raggio $\epsilon > 0$ tale che:

$$f(\underline{x}^*) \leq f(\underline{x}) \quad \forall \underline{x} \in X \cap I(\underline{x}^*, \epsilon)$$

2

Ottimizzazione non vincolata

Definizione 2.0.1 (Direzione di discesa). Data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, un vettore $\underline{d} \in \mathbb{R}^n$ si dice direzione di discesa per f in \underline{x} se:

$$\exists \lambda > 0 : f(\underline{x} + \lambda \underline{d}) < f(\underline{x})$$

Definizione 2.0.2 (Derivata direzionale). Sia data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, un vettore $\underline{d} \in \mathbb{R}^n$ e un punto dove f è definita. Se esiste il limite:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0^+} \frac{f(\underline{x} + \lambda \underline{d}) - f(\underline{x})}{\lambda}$$

allora tale limite prende il nome di derivata direzionale della funzione f nel punto \underline{x} lungo la direzione \underline{d}

2.1 Condizioni necessarie di ottimalità del primo ordine

Teorema 2.1.1 (Condizioni necessarie di ottimalità del primo ordine). Data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, derivabile in $\underline{x}^* \in \mathbb{R}^n$, condizione necessaria affinché il punto \underline{x}^* sia un minimo locale per f è che il gradiente della funzione calcolato in \underline{x}^* sia nullo.

2.2 Condizioni necessarie di ottimalità del secondo ordine

Teorema 2.2.1 (Condizioni necessarie di ottimalità del secondo ordine). Data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ di classe $\underline{C}^2(\underline{x}^*)$, condizione necessarie affinché il punto \underline{x}^* sia un minimo locale per f è che il gradiente della funzione calcolato in \underline{x}^* sia nullo e che valga la relazione seguente:

$$\underline{d}^T H(\underline{x}^*) \underline{d} \geq 0 \forall \underline{d} \in \mathbb{R}^n$$

Cioè l'hessiana è definita come **semipositiva**.

2.3 Condizioni necessarie di ottimalità in senso stretto del secondo ordine

Teorema 2.3.1 (Condizioni necessarie di ottimalità del secondo ordine). Data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ di classe $\underline{C}^2(\underline{x}^*)$, condizione necessarie affinché il punto \underline{x}^* sia un minimo locale in **senso stretto** per f è che il gradiente della funzione calcolato in \underline{x}^* sia nullo e che valga la relazione seguente:

$$\underline{d}^T H(\underline{x}^*) \underline{d} > 0 \forall \underline{d} \in \mathbb{R}^n$$

Cioè l'hessiana è definita come **positiva**.

3

Programmazione quadratica

Nella programmazione quadratica si approssima f con il seguente modello quadratico:

$$\min f(\underline{x}) = \frac{1}{2} \underline{x}^T Q \underline{x} + \underline{b}^T \underline{x}$$

Esistono pochi casi possibili:

Q non è semidefinita positiva f non ha un punto di minimo.

Q è definita positiva $\underline{x}^* = Q^{-1} \underline{b}$ è l'unico minimo globale.

Q è definita semi-positiva **Q non è singolare** $\underline{x}^* = Q^{-1} \underline{b}$ è l'unico minimo globale.

Q è singolare non esiste una soluzione o esistono infinite soluzioni.

4

Convergenza

Ovviamente un algoritmo è buono se converge rapidamente.

4.1 Algoritmo convergente localmente e globalmente

4.1.1 Convergente localmente

Un algoritmo è convergente localmente quando converge solo se il punto da cui parte è in un intorno del punto ottimo.

4.1.2 Convergente globalmente

Un algoritmo è convergente globalmente quando converge partendo da qualsiasi punto del dominio.

4.2 Velocità di convergenza

4.2.1 Q-lineare

Quando il rapporto tra lo step k e lo step $k + 1$ mantiene un valore costante.

4.2.2 Q-superlineare

Quando il rapporto tra lo step k e lo step $k + 1$ all'infinito è nullo.

4.2.3 Q-quadratica

Quando il rapporto tra lo step k quadro e lo step $k + 1$ mantiene un valore costante.

5

Metodi di ottimizzazione continua

Si tratta del problema di determinare a partire dallo step k lo step $k + 1$ in modo tale da avvicinarsi all'ottimo della funzione.

Esistono due strategie:

Line search Si determina una direzione e quindi si stabilisce una distanza con cui muoversi in questa direzione.

Trust region Si determina un raggio (una distanza) di confidenza e quindi si stabilisce una direzione nel limite di questa circonferenza verso cui muoversi.

Esiste chiaramente un tradeoff tra velocità e precisione nello stabilire la distanza con cui muoversi.

5.1 Condizioni di Wolfe

Per essere efficace, la line-search approssimata richiede che siano rispettate le condizioni di Wolfe. Esse sono due, una di **decremento sufficiente** ed una di **curvatura**, dove i coefficienti \underline{c} sono tali che $0 < c_1 < c_2 < 1$

$$\begin{aligned} f(\underline{x} + \alpha \underline{d}) &\leq f(\underline{x}) + c_1 \alpha \nabla f(\underline{x})^T \underline{d} \\ \phi(\alpha) &\leq \phi(0) + \alpha c_1 \phi'(0) \end{aligned}$$

(a) Condizione di decremento sufficiente

$$\begin{aligned} f(\underline{x} + \alpha \underline{d})^T \underline{d} &\geq c_2 \alpha \nabla f(\underline{x})^T \underline{d} \\ \phi'(\alpha) &\geq c_2 \phi'(0) \end{aligned}$$

(b) Condizione di curvatura

Figura 5.1: Condizioni di Wolfe

Le condizioni di Wolfe forti introducono un vincolo di segno sulla curvatura (valore assoluto).

5.2 Metodo di Armijo per stabilire la stepsize

Si itera riducendo gradualmente la distanza di un fattore σ , usualmente pari circa a 0.9 sino a che il valore dello step successivo è più vicino all'ottimo dello step corrente. Nei metodi Newton e quasi Newton il coefficiente della distanza è inizializzato usualmente a 1.

5.3 Convergenza dei metodi di ricerca lineare approssimata

Se definiamo θ_k come l'angolo tra \underline{d}_k e $-\nabla f_k$, allora possiamo determinare il coseno dell'angolo come:

$$\cos \theta_k = \frac{-\nabla f(\underline{x})_k^T \underline{d}_k}{\|\nabla f(\underline{x})_k\| \cdot \|\underline{d}_k\|}$$

Teorema 5.3.1. Sia \underline{d}_k una direzione di discesa e sia α_k una distanza che rispetti le condizioni di Wolfe. Sia inoltre f una funzione limitata inferiormente su \mathbb{R}^n , **differenziabile continuamente** sull'insieme M che contiene $L_f = \{\underline{x} : f(\underline{x}) \leq f(\underline{x}_0)\}$, dove \underline{x}_0 è il punto di inizio. Assumiamo inoltre che ∇f sia **lipschitziana** sull'insieme M . Allora:

$$\sum_{j=0}^{\infty} \cos^2 \theta_j \|\nabla f(\underline{x}_j)\|^2 \leq \infty$$

Dimostrazione. Essendo valida la **condizione di curvatura**, allora vale la disequazione:

$$\nabla f_{k+1}^T \underline{d}_k \geq c_2 \nabla f_k^T \underline{d}_k$$

Sottraggo ad ambo i lati $\nabla f_k \underline{d}_k$ ed ottengo:

$$(\nabla f_{k+1}^T - \nabla f_k^T) \underline{d}_k \geq (c_2 - 1) \nabla f_k^T \underline{d}_k$$

Siccome il gradiente della funzione è **lipschitziano** vale la disequazione:

$$(\nabla f_{k+1}^T - \nabla f_k^T) \underline{d}_k \leq \|\nabla f_{k+1} - \nabla f_k\| \|\underline{d}_k\| \leq L \|\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_k\| \|\underline{d}_k\| = \alpha_k L \|\underline{d}_k\|^2$$

Da questa disequazione ricaviamo il valore di α_k :

$$\alpha_k \geq \frac{c_2 - 1}{L} \frac{\nabla f_k^T \underline{d}_k}{\|\underline{d}_k\|^2}$$

Essendo quindi valida la **condizione di decremento sufficiente** vale la disequazione:

$$f_{k+1} \leq f_k + c_1 \alpha_k \underline{d}_k^T \nabla f_k = f_k - c_1 \frac{1 - c_2}{L} \frac{(\nabla f_k^T \underline{d}_k)^2}{\|\underline{d}_k\|^2}$$

Pongo $c = c_1 \frac{1 - c_2}{L}$ ed ottengo:

$$f_{k+1} \leq f_k + c_1 \alpha_k \underline{d}_k^T \nabla f_k = f_k - c \frac{(\nabla f_k^T \underline{d}_k)^2}{\|\underline{d}_k\|^2}$$

Sostituisco $\cos \theta_k = \frac{-\nabla f(\underline{x})_k^T \underline{d}_k}{\|\nabla f(\underline{x})_k\| \|\underline{d}_k\|}$ ed ottengo:

$$f_{k+1} \leq f_k + c_1 \alpha_k \underline{d}_k^T \nabla f_k = f_k - c \cos^2 \theta_k \|\nabla f_k\|^2$$

Per ricorsione ottengo la sommatoria:

$$f_{k+1} \leq f_k + c_1 \alpha_k \underline{d}_k^T \nabla f_k = f_0 - c \sum_{j=0}^k \cos^2 \theta_j \|\nabla f_j\|^2$$

Siccome la funzione f è limitata inferiormente si ottiene la **condizione di Zoutendijk**:

$$c \sum_{j=0}^k \cos^2 \theta_j \|\nabla f_j\|^2 \leq f_0 - f_{k+1} < \infty$$

Questo implica che:

$$\cos^2 \theta_j \|\nabla f_j\|^2 \rightarrow 0$$

Quindi se l'algoritmo soddisfa anche la **condizione angolare** (cioè sceglie una direzione di discesa che la rispetta) $\cos \theta_k \geq \epsilon > 0$ allora **converge**:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\nabla f(\underline{x}_k)\| = 0$$

□

Metodi di ottimizzazione

6.1 Metodi a discesa rapida

Son metodi che usano come funzione di aggiornamento $\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k - \alpha_k \nabla f_k$, in cui le direzioni sono ortogonali al contorno della funzione. Non dovendo calcolare l'hessiana lo sforzo computazionale non è eccessivo e converge globalmente, ma estremamente piano quando una funzione è patologica.

Teorema 6.1.1 (Velocità di convergenza locale dei metodi a discesa rapida). Data una matrice Q definita positiva, la seguente relazione vale $\forall \underline{x} \in \mathbb{R}^n$:

$$\frac{(\underline{x}^T \underline{x})^2}{(\underline{x}^T Q \underline{x})(\underline{x}^T Q^{-1} \underline{x})} \geq \frac{4\lambda_{\min}\lambda_{\max}}{(\lambda_{\min} + \lambda_{\max})^2}$$

Dove λ_{\min} e λ_{\max} son gli autovalori minimo e massimo di Q .

Ne segue che la velocità di convergenza dei metodi a discesa rapida è **lineare** per i modelli quadratici.

$$\frac{\|\underline{x}_{k+1} - \underline{x}^*\|_Q}{\|\underline{x}_k - \underline{x}^*\|_Q} \leq \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})}$$

6.2 Metodi Newton

Prendendo in considerazione l'approssimazione di Taylor fermata al secondo ordine, quindi con l'hessiana, otteniamo come direzione di discesa quella che minimizza $\nabla f^T \underline{d} + \frac{1}{2} \underline{d}^T H \underline{d}$, cioè $\underline{d} = -(H)^{-1} \nabla f$. Quando H è **definita positiva** vale che:

$$\nabla f^T \underline{d} = -\underline{d}^T H \underline{d} \leq -\sigma \|\underline{d}\|^2$$

Cioè quando H è **definita positiva** la direzione di Newton è la **direzione di discesa**.

Nei **modelli quadratici** con Q **definita positiva** il metodo di Newton converge in un'iterazione, altrimenti non converge. Su funzioni generiche, la qualità della direzione dipende da quanto è definita positiva la matrice hessiana.

Teorema 6.2.1 (Convergenza dei metodi di Newton). Sia $f \in C^2$ e sia $H(x)$ continuamente lipschitziana in un intorno del punto ottimo \underline{x}^* . Si assuma che valga $\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \underline{d}_k$. Allora:

1. Se \underline{x}_0 è sufficientemente vicino a \underline{x}^* , allora $\{\underline{x}_k\} \rightarrow \underline{x}^*$
2. $\{\underline{x}_k\}$ converge **quadraticamente**

3. $\{\|\nabla f(\underline{x}_k)\|\}$ converge quadraticamente a zero.

I metodi Newton sono **convergenti localmente**.

La complessità computazionale è di $O(n^3)$

6.2.1 Metodi Newton modificati

Sono metodi che modificano l'Hessiano, o rendendo la matrice positiva o scegliendo una direzione di discesa tramite metodi di discesa rapida quando necessario.

6.3 Metodi Quasi-Newton

Sono metodi in cui viene utilizzata un'approssimazione dell'Hessiano, che è computazionalmente costoso da calcolare. Viene utilizzata al suo posto una matrice chiamata G_k al posto di H_k^{-1} , e quindi calcolano la direzione di discesa come $\underline{d}_k = -G_k \nabla f(\underline{x}_k)$.

Definizione 6.3.1 (Relazione secante). Definendo $\underline{p}_k = \nabla f(\underline{x}_{k+1}) - \nabla f(\underline{x}_k)$ possiamo definire la relazione secante:

$$H(\underline{x}_k) \underline{h}_k \approx \underline{p}_k \quad \text{or} \quad H(\underline{x}_k)^{-1} \underline{p}_k \approx \underline{h}_k$$

Inizializzando $G_0 = I$, possiamo imporre che ad ogni iterazione la matrice G_{k+1} debba soddisfare la relazione secante con la seguente uguaglianza:

$$G_{k+1} \underline{p}_k = \underline{h}_k$$

La realizzazione specifica di come si ottiene G_{k+1} partendo da G_k varia dai differenti metodi Quasi-Newton. Questi metodi impongono che $G_k = G_k^T$ e che $G_{k+1} - G_k$ abbia un rango basso.

Ne esistono di due categorie:

1. Matrice a rango unitario simmetrico o SR1.
2. A rango due:
 - (a) DFP
 - (b) BFGS

I **metodi a rango due** hanno alcune proprietà interessanti:

1. La matrice G_k converge a $H(\underline{x}_k)^{-1}$ sui modelli quadratici.
2. Se G_0 è definita positiva allora tutte le G_k sono definite positive.
3. Il costo computazionale è di $O(n^2)$ in ogni iterazione.
4. La velocità di convergenza è **superlineare**.
5. In particolare il metodo BFGS garantisce convergenza globale se lo step-size rispetta le condizioni di Wolfe.

6.4 Metodi del gradiente coniugato

Si tratta di una delle tecniche più utili per risolvere sistemi lineari di grandi dimensioni e può essere adattata per risolvere problemi di ottimizzazione non lineare. Si tratta di un metodo iterativo che risolve sistemi della forma $A\underline{x} = \underline{b}$ dove A è una matrice definita positiva che è $A = A^T$.

Definizione 6.4.1 (Vettori coniugati). Un insieme di vettori $\underline{p}_0, \underline{p}_1, \dots, \underline{p}_h$ è detto **coniugato** rispetto ad una matrice A se vale la relazione:

$$\underline{p}_i^T A \underline{p}_j = 0 \quad \forall i \neq j$$

Dato un punto di inizio \underline{x}_0 e le **direzioni coniugate** $\underline{p}_0, \dots, \underline{p}_{n-1}$ generiamo la sequenza $\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \alpha_k \underline{p}_k$ dove α_k è un minimizzatore monodimensionale ed è dato da:

$$\alpha_k = -\frac{r_k^T \underline{p}_k}{\underline{p}_k^T A \underline{p}_k}$$

Teorema 6.4.2. Convergenza di sequenza con vettori coniugati Dato un qualsiasi \underline{x}_0 , la sequenza generata da $\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \alpha_k \underline{p}_k$ converge a \underline{x}^* in al più n iterazioni.

Il metodo del gradiente coniugato è un metodo a direzione coniugata con una proprietà importante: \underline{p}_k può essere ottenuta sapendo solo \underline{p}_{k-1} e \underline{p}_k risulta coniugato a tutte le direzioni precedenti.

Il vettore \underline{p}_k è definito come una combinazione lineare del gradiente e del vettore precedente:

$$\underline{p}_k = -\nabla f_k + \beta_k \underline{p}_{k-1}$$

Dove β è definito sfruttando la definizione di vettore coniugato:

$$\beta_k = \frac{\nabla f_k^T A \underline{p}_{k-1}}{\underline{p}_{k+1}^T A \underline{p}_{k-1}}$$

Inizialmente il valore del vettore è $\underline{p}_0 = -\nabla f_0$.

Esistono vari metodi del gradiente coniugato che variano in base a come viene calcolato il valore di β_{k+1} a partire dall'iterazione precedente.

In particolare è utile perchè utilizza poco spazio, non è computazionalmente pesante e converge rapidamente. Viene però preferita l'eliminazione gaussiana quando il problema è di piccola dimensione, essendo meno sensibile agli errori di arrotondamento.

6.5 Metodi Trust Region

Questi metodi realizzano un modello della funzione con lo sviluppo di Taylor fermato al secondo ordine, ma può usare sia l'Hessiano che una sua approssimazione. Tramite questo si determina un raggio della trust region e quindi si procede ad ottenere una direzione tale che minimizzi la funzione, e nel caso la discesa non sia sufficiente si riduce il raggio e si ripete l'operazione. Per un raggio sufficientemente grande, quando viene utilizzata l'Hessiana e questa è definita positiva la direzione che si ottiene coincide con quella che si otterrebbe dai metodi Newton.

Il metodo della trust region richiede di calcolare una sequenza di sottoproblemi la cui funzione obiettivo e vincoli sono entrambi quadratici.

Teorema 6.5.1. Il vettore \underline{p}^* è una soluzione globale per il problema di trust-region di raggio Δ :

$$\min_{\underline{p} \in \mathbb{R}^n} m(\underline{p}) = f(\underline{x}) + \nabla f^T \underline{p} + \frac{1}{2} \underline{p}^T B \underline{p} \quad \|\underline{p}\| \leq \Delta$$

se e solo se \underline{p}^* appartiene alla trust-region ed esiste uno scalare $\lambda \geq 0$ tale per cui:

$$\begin{cases} (B + \lambda I) \underline{p}^* &= -\nabla f \\ \lambda(\Delta - \|\underline{p}^*\|) &= 0 \\ (B + \lambda I) &\text{è definita semipositiva} \end{cases}$$

I metodi trust-region garantiscono convergenza globale grazie ad una riduzione sufficiente del modello che può essere quantificata in termini del **punto di Cauchy**, definito come il punto minimo del modello quadratico lungo la direzione $-\nabla f$. Questo punto può essere calcolato nell'ordine di $O(n^2)$ e viene utilizzato per determinare se la soluzione di un sotto problema è accettabile.

Un metodo trust-region sarà globalmente convergente se un suo step \underline{p}_k dà una riduzione nel modello m_k che è almeno un multiplo positivo della decrescita ottenuta tramite lo step di Cauchy. Se scegliessimo sempre il punto di Cauchy per la discesa implementeremmo banalmente il metodo di discesa rapida con una scelta fissata della step length e questo sarebbe poco efficiente.

Dobbiamo utilizzare le informazioni che possiamo trarre dalla matrice B_k , la nostra approssimazione (o coincidente) dell'Hessiana.

6.5.1 Metodo zampa di cane

Questo metodo risulta applicabile quando la matrice B è definita positiva. Si inizia computando il punto $\underline{p}^{(B)} = -B^{-1}\nabla f$ e quindi se questo punto cade nel raggio della regione ammissibile esso coincide con il punto ottimo \underline{p}^* . Altrimenti si determina una traiettoria ottimale tra un punto $\underline{p}^{(U)} = -\frac{\nabla f^T \nabla f}{\nabla f^T B \nabla f} \nabla f$ ed il punto $\underline{p}^{(B)}$ seguendo la curva seguente:

$$\underline{p}(\tau) = \begin{cases} \tau \underline{p}^{(U)} & \tau \in [0, 1] \\ \underline{p}^{(U)} + (\tau - 1)(\underline{p}^{(B)} - \underline{p}^{(U)}) & \tau \in [1, 2] \end{cases}$$

6.5.2 Proprietà della matrice B

Se la matrice B risulta definita semi positiva, allora:

1. $\|\underline{p}(\tau)\|$ è una funzione crescente di τ
2. $m(\underline{p}(\tau))$ è una funzione decrescente di τ
3. τ può essere calcolata risolvendo l'equazione scalare quadratica:

$$\left\| \underline{p}^{(U)} + (\tau - 1)(\underline{p}^{(B)} - \underline{p}^{(U)}) \right\|^2 = \Delta^2$$

4. Esistono metodi iterativi per risolvere il modello quadratico.
5. La convergenza può arrivare ad essere **super-lineare**.

Parte II

Programmazione lineare intera

7

Programmazione lineare intera