



UNIVERSITA' DI PISA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA
ANNO ACCADEMICO 2004-2005

TESI DI LAUREA

SVILUPPO DI METODI DECONVOLUTIVI PER
L'INDIVIDUAZIONE DI SORGENTI INDIPENDENTI SU DATI DI
RISONANZA MAGNETICA FUNZIONALE

Candidato: **Luca Giannini**

Relatori:

Prof. Luigi Landini

Prof. Roberto Roncella

Ing. Nicola Vanello

A mamma e papà

INDICE

Introduzione	1
1 Il segnale fMRI	4
1.1 Principi fisici di base.....	4
1.2 La risposta emodinamica cerebrale e il segnale fMRI.....	9
1.3 Possibili fonti di rumore.....	12
1.4 Risoluzione spaziale e temporale della fMRI.....	14
1.5 Un modello lineare.....	16
2 Gradienti e metodi di ottimizzazione	22
2.1 Nozioni di base.....	22
2.2 La discesa del gradiente.....	24
2.3 La discesa del gradiente stocastico.....	26
2.4 Il Gradiente naturale.....	28
2.4.1 Lo spazio di Riemann.....	29
3 Analisi delle componenti indipendenti e BSS	33
3.1 Motivazioni.....	33
3.2 Modello generativo.....	34
3.3 Ambiguità espresse dall'ICA.....	36
3.4 Assunzioni sul modello.....	38

3.5	<i>Incorrelazione</i>	39
3.6	<i>Sbiancamento</i>	40
3.7	<i>Dal teorema del limite centrale alla ICA</i>	41
3.8	<i>ICA e misura della nongaussianità tramite Kurtosis</i>	43
3.9	<i>ICA e misura della nongaussianità tramite Neg-Entropia</i>	44
3.10	<i>ICA Tramite minimizzazione della mutua informazione</i>	47
3.11	<i>Algoritmi FastICA</i>	49
4	<i>Mescolamenti convolutivi ed estrazione delle sorgenti</i>	52
4.1	<i>Definizione del problema</i>	52
4.2	<i>Modello a singolo canale (SISO)</i>	54
4.3	<i>Tipologie di metodi deconvolutivi a singolo canale</i>	56
4.3.1	<i>Bussgang</i>	56
4.3.2	<i>Riformulazione secondo l'ICA standard</i>	58
4.4	<i>Modello a canale multiplo (MIMO)</i>	59
4.5	<i>Tipologie di metodi deconvolutivi a canale multiplo</i>	60
4.5.1	<i>Riformulazione in accordo allo standard ICA</i>	60
4.5.2	<i>Metodi nel dominio della frequenza</i>	67
4.5.3	<i>Metodi nel dominio del tempo</i>	68
5	<i>Algoritmi per la stima del modello convolutivo</i>	70
5.1	<i>BSS convolutiva tramite il gradiente naturale</i>	70
5.1.1	<i>Definizione del modello</i>	71
5.1.2	<i>Applicazione teorica a processi convolutivi</i>	74
5.1.3	<i>Deconvoluzione a singolo canale</i>	76
5.1.4	<i>Deconvoluzione a canale multiplo</i>	79
5.1.5	<i>Implementazione pratica</i>	83

5.2	<i>BSS convolutiva nel dominio della frequenza</i>	85
5.2.1	<i>Scelta delle opportune finestre temporali</i>	89
6	<i>Simulazione del modello convolutivo per segnali fMRI</i>	92
6.1	<i>Costruzione del modello</i>	92
6.2	<i>Deconvoluzione nel dominio del tempo</i>	94
6.3	<i>Deconvoluzione nel dominio della frequenza</i>	100
6.4	<i>Valutazione dell'accuratezza della deconvoluzione</i>	104
6.5	<i>Confronto con il modello istantaneo</i>	106
7	<i>Applicazione su segnali acquisiti tramite scansione fMRI</i>	108
7.1	<i>Scelta delle serie temporali tramite regressione lineare</i>	108
7.2	<i>Segnali utilizzati</i>	111
7.3	<i>Estrazione delle sorgenti e valutazione del ritardo</i>	113
7.3.1	<i>Separazione nel dominio temporale</i>	113
7.3.2	<i>Separazione nel dominio frequenziale</i>	115
7.4	<i>Confronto con il modello istantaneo</i>	117
	<i>Conclusioni</i>	119
	<i>Appendice A</i>	121
	<i>Appendice B</i>	124
	<i>Bibliografia</i>	134
	<i>Ringraziamenti</i>	138

Introduzione

La tecnica di risonanza magnetica funzionale per immagini (fMRI) è un metodo non invasivo per determinare la distribuzione spaziale e temporale dell'attività cerebrale indotta da compiti sensoriali, motori e cognitivi. Nel contesto dell'analisi dei dati fMRI, grande sviluppo ha avuto e sta avendo, la tecnica della separazione delle sorgenti nascoste (Blind Source Separation) che, a partire dai segnali misurati, ricerca le sorgenti che li hanno generati nell'ipotesi che queste ultime siano statisticamente indipendenti. Sotto questa forma il metodo prende il nome di Analisi delle Componenti Indipendenti (ICA) e si differenzia dai classici procedimenti di analisi basati sulla regressione, la correlazione o la sottrazione di immagini per il fatto che nessuna ipotesi *a priori* è necessaria se non quella sull'indipendenza statistica delle sorgenti.

Il modello base utilizzato nell'analisi delle componenti indipendenti, come in altri metodi di analisi multivariata, considera i segnali osservati come derivati dal mescolamento istantaneo delle varie sorgenti. Nel caso di dati di risonanza magnetica funzionale, questo modello può risultare inadeguato visto che lo stesso processo cognitivo può generare, in diverse aree cerebrali, variazioni del segnale con una differente dinamica temporale; questo può essere dovuto sia ad una diversa attività neurale, ma anche alla eterogeneità della risposta emodinamica. L'attivazione di due o più voxel (elementi volumetrici di base in cui è suddivisa l'immagine acquisita) che sovrintendono alle medesime funzioni, può risultare ad esempio reciprocamente ritardata a causa dell'inevitabile latenza dei processi

emodinamici di base. Tale ritardo si traduce nell'acquisizione di segnali sfasati tra loro e difficilmente identificabili tramite criterio multivariato istantaneo.

In questa tesi presentiamo un approccio al problema di BSS basato su un modello di mescolamento convolutivo: ogni segnale osservato, è generato da sorgenti statisticamente indipendenti, mescolate tra loro dopo aver subito un processo di convoluzione.

Questo tipo d'orientamento permette di estendere il modello istantaneo in modo da tenere conto delle differenze in ampiezza, latenza e durata del segnale fMRI nelle varie regioni. L'obiettivo di questa tesi è verificare la bontà del modello convolutivo nel caso di segnali fMRI con le caratteristiche sopradette.

Nel primo capitolo di questo elaborato vengono presentati i principi fisici da cui deriva il segnale fMRI e le sue caratteristiche specifiche ed essenziali. Particolare attenzione è riservata alla relazione con la risposta emodinamica cerebrale, alla risoluzione spazio-temporale e alle possibili fonti di rumore che complicano l'acquisizione dei dati. Infine viene proposto un modello lineare della risposta fMRI utile a quantificare la risposta neurale indotta da stimolazioni sensoriali e quindi a valutare l'attivazione di corrispondenti zone cerebrali.

Il capitolo secondo introduce i concetti fondamentali della teoria dell'ottimizzazione e dei metodi basati sul gradiente che sono alla base degli algoritmi di separazione delle sorgenti nascoste (BSS). In particolare viene proposta una possibile generalizzazione del metodo del gradiente, applicata a spazi non euclidei.

Il capitolo terzo copre il classico problema dell'individuazione e separazione delle sorgenti nascoste, riferendosi in particolare all'ipotesi che queste ultime siano statisticamente indipendenti (ICA). E' esposto il principio base della non-gaussianità e la sua relazione con l'ICA. Sono rivisti i principi della mutua informazione e della Neg-Entropia unitamente alle relazioni tra questi tre principi fondamentali.

Nel quarto capitolo è esposto in maniera dettagliata il problema del mescolamento convolutivo, in cui le sorgenti indipendenti subiscono un processo di filtraggio non più modellizzabile con una semplice matrice scalare. Vengono inoltre presentati una serie di approcci al problema sia in ambito temporale sia in quello frequenziale allo scopo di deconvolvere e separare le sorgenti indipendenti.

La traduzione dei concetti teorici in algoritmi pratici per la stima del modello convolutivo sia nel tempo che in frequenza è presentata nel quinto capitolo.

L'analisi e l'applicazione, degli algoritmi sviluppati, a segnali fMRI simulati riguarda il contenuto del sesto capitolo; lo scopo è di testarne le potenzialità nel deconvolvere le componenti indipendenti. Il processo convolutivo viene modellizzato tramite l'uso di filtri FIR con i quali è possibile tenere conto delle differenti dinamiche del segnale.

Il settimo ed ultimo capitolo, invece, tratta l'applicazione a dati reali acquisiti nel laboratorio di risonanza magnetica dell'Istituto di Fisiologia Clinica del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Pisa. Si espongono quindi i risultati ottenuti e si traggono le conclusioni del lavoro svolto.

Le elaborazioni svolte sono state effettuate in ambiente Matlab 6.5 della MathWorks.