

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN
INGEGNERIA INFORMATICA

ELABORAZIONE DI MAPPE ACUSTICHE
TRAMITE ARRAY MICROFONICI

Relatore:

Chiar.mo Prof. ANGELO FARINA

Correlatore:

Dott. Ing. SIMONE CAMPANINI

Tesi di laurea di:

LORENZO ROTTEGLIA

ANNO ACCADEMICO 2012–2013

alla mia famiglia.

Indice

1	Premessa	1
2	Elementi di acustica	3
2.1	Introduzione	3
2.2	Grandezze fondamentali	3
2.2.1	Frequenza e Periodo	4
2.2.2	Velocità di propagazione e lunghezza d'onda	5
2.3	Onde acustiche	6
2.3.1	La scala dei Decibell	6
2.3.2	livello di pressione	8
2.3.3	Livello equivalente	8
2.4	Sistema uditivo umano	9
2.4.1	Effetti di non linearità dell'orecchio umano	11
2.4.2	Bande frequenziali	12
2.4.3	Filtri di ponderazione	12
3	Array microfonici	14
3.1	Array sferico: Eigenmike	14
3.2	Array cilindrico	14
3.3	Array planare	14
4	Sintesi di microfoni virtuali	15
4.1	Elaborazione dei segnali microfonici	15
4.2	Sistema di Elaborazione	15
4.3	Implementazione del calcolo convolutivo	15

5	Ambiente di Sviluppo: l'host Audacity	16
5.1	Libreria per la costruzione di interfacce grafiche <i>WxWidgets</i> . . .	16
5.2	Altre librerie	16
5.3	Libreria per elaborazione audio-video: <i>ffmpeg</i>	16
6	Dettagli di Implementazione	17
6.1	Elaborazione numerica del suono	18
6.2	Acquisizione del video	18
6.3	Livello di fondo scala	18
6.4	<i>Mirroring</i> dei microfoni virtuali	19
6.5	<i>Meshing</i> della superficie mediante l'operazione di triangolazione di <i>Delaunay</i>	19
6.6	Interpolazione dei valori acquisiti e filtraggio in bande d'ottava . .	22
6.7	Mappatura con scale cromatiche e <i>auto-scaling</i>	24
6.8	Esportazione dei risultati	25
7	Descrizione plug-in: un manuale d'uso	26
7.1	Configuration Dialog	26
7.2	Interfaccia	26
7.3	Selezione dell'intervallo temporale da analizzare	26
8	Conclusioni	27
A	Appendice	28
A.1	Propagazione di onde sonore	28
A.2	Intensità, densità di energia e potenza	30
A.3	Livelli sonori	31
A.4	Curve di ponderazione	33
A.5	Trasformata di Fourier	33

Elenco delle figure

2.1	Moto delle particelle di un fluido elastico compresse e decomprese alternativamente da un pistone, creando l' <i>onda sonora</i>	4
2.2	Livello sonoro di una sorgente intermittente e relativo livello equi- valente <i>Leq</i>	9
2.3	Apparato acustico umano.	10
2.4	Risposta non lineare della coclea	10
2.5	Grafico delle curve isofoniche	11
2.6	Grafico delle curve di ponderazione	13
6.1	Rappresentazione schematica del processo di <i>mirroring</i> , necessario a garantire la continuità ai bordi della mappa.	20
6.2	Direzioni di puntamento delle capsule dell'Eigenmike sovrapposte ad una foto panoramica del Teatro alla Scala di Milano, svolta secondo lo schema di proiezione visto nella sezione 6.4.	20
6.3	Descrizione della proprietà dei triangoli formati con l'algoritmo di <i>Delaunay</i>	22
8.1	Graphic User Interface sotto le tre diverse piattaforme principali: <i>Windows</i> , <i>Mac OS X</i> e <i>Linux</i>	27

Elenco delle tabelle

2.1	Velocità del suono in alcuni mezzi (fonte:).	5
2.2	Valori di pressione e di SPL relativi a alcuni suoni comuni.	7
2.3	Definizione delle diverse bande e relative frequenze di centro-banda per le due diverse analisi descritte.	13

Capitolo 1

Premessa

Il presente progetto di tesi si pone l'obiettivo mappare il campo acustico dinamico di un ambiente (interno o esterno) tramite una sonda, nella fattispecie un *array microfonico*. Il risultato richiesto quindi è quello di ottenere un videoclip composto dalla sovrapposizione di:

un videoclip di sfondo ottenuto da una particolare videocamera, che rappresenti l'ambiente circostante e contenente quindi un'informazione visiva.

la mappa acustica dinamica composta di bande colorate rappresentanti i livelli sonori istantanei nel campo acustico.

eventuali *metadata* quali le posizioni delle singole capsule microfoniche dell'array, o i valori dei livelli sonori in determinate posizioni di interesse.

Si tratta di un *plug-in* scritto per l'ambiente di editing audio *Audacity*¹, celebre software *open-source* in grado di registrare e elaborare segnali audio, e genera da essi una *mappa acustica*, composta da bande di colore che corrispondono ai diversi livelli sonori attorno all'array sonda, posto nell'ambiente di misura.

Questo tipo di *tool* può avere svariate applicazioni tecnologiche in quanto è in grado di rendere visibile i campi sonori i quali contengono invece una informazione di tipo uditivo. La potenza di questa operazione sinestetica di traduzione di un'informazione visiva in una uditiva, risiede principalmente nella maggior apprezzabilità delle grandi qualità di definizione spaziale degli array microfonici.

¹<http://audacity.sourceforge.net/?lang=it>

Dal punto di vista applicativo, il sistema sviluppato può essere di estrema utilità nella precisa individuazione di sorgenti sonore, nonché nella misura delle loro emissioni. Basti pensare per esempio ad ambienti di tipo industriale, nei quali spesso il campo acustico è complesso e generato da molteplici e varie sorgenti che spesso risultano difficili da individuare con precisione. Un altro esempio calzante riguarda gli ambienti molto ristretti come gli abitacoli di automobili o aerei, nei quali il cui confort è una specifica di progetto che attualmente ricopre un notevole interesse.

In particolare, la principale espansione da me svolta durante questa tesi, rende il software in grado di generare una mappa *dinamica* riflettendo i cambiamenti del campo acustico attorno alla sonda istante per istante e sovrapponendo questo risultato a un video di sfondo, posto in trasparenza e acquisito mediante telecamere installate appositamente sulle sonde utilizzate e raffigurante l'ambiente stesso di misura.

Di seguito, in sintesi, il contenuto:

Capitolo 2 richiami teorici sulla acustica di base e riguardo alcune proprietà fisiche del suono, ausilio fondamentale a tutta la trattazione successiva.

Capitolo 3 introduzione agli array microfonici come tecnica di misura dei campi acustici e delle loro proprietà spaziali di direttività e direzionalità.

Capitolo 4 concetto di microfono virtuale e relativa sintesi a partire da registrazioni multicanale, ovvero possibilità offerte da questo artificio nella fattispecie riguardo al campionamento spaziale di un campo acustico.

Capitolo 5 descrizione dell'ambiente software definito dal programma *host* scelto (*Audacity*) e librerie esterne utilizzate, per elaborazioni grafiche, audio nonché per garantire una portabilità multiplatforma.

Capitolo 6 dettagli sul funzionamento interno del *plug-in*, algoritmi utilizzati e flusso di lavoro.

Capitolo 7 breve manuale d'uso per un utilizzatore del *plug-in*, possibili analisi e parametri significativi.

Capitolo 2

Elementi di acustica

2.1 Introduzione

Nel presente capitolo verranno fornite le nozioni di base riguardanti i principi fisici fondamentali della fisica del suono.

Partendo dalle grandezze fondamentali che caratterizzano l'analisi del fenomeno sonoro, si parlerà della descrizione delle diverse onde sonore per arrivare a una descrizione di campo acustico di cui si cerca di fornire una mappa visiva.

2.2 Grandezze fondamentali

Il fenomeno sonoro si genera dalla variazione di pressione in un mezzo materiale elastico (fluido o solido) la quale si propaga senza trasporto di materia. Le molecole del mezzo in cui si propagano i suoni, si muovono parallelamente alla direzione di propagazione. Un'onda sonora che viaggia attraverso l'aria non è altro che una successione di rarefazioni e compressioni di piccole porzioni d'aria; ogni singola molecola trasferisce energia alle molecole adiacenti e, dopo il passaggio dell'onda, ritorna pressappoco nella sua posizione iniziale.

Consideriamo l'esempio di un fluido che viene compresso dal movimento armonico di un pistone come rappresentato in Figura 2.1. Le particelle del fluido adiacenti alla superficie del pistone saranno spostate dal suo movimento verso le particelle subito adiacenti a esse e si verificherà quindi una compressione locale. Subito dopo il pistone retrocederà lasciando un spazio libero dietro di sé che

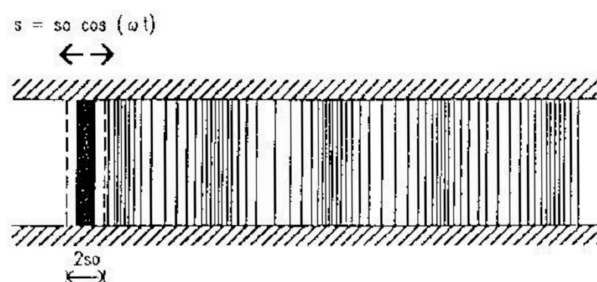


Figura 2.1: Moto delle particelle di un fluido elastico compresse e decomprese alternativamente da un pistone, creando l'onda sonora.

tenderà a richiamare le particelle che erano state spinte inizialmente, mentre le particelle adiacenti ad esse continueranno il loro movimento nella direzione opposta creando una regione di decompressione locale adiacente al pistone. Questo andamento alternativo creerà il fenomeno ondulatorio il quale viene denominato onda sonora nel momento in cui viene percepito dalle nostre orecchie.

2.2.1 Frequenza e Periodo

Riferendoci per comodità all'esempio precedente, il moto armonico del pistone è caratterizzato dalla frequenza f con cui la superficie piana si muove. La frequenza indica il numero di cicli compiuti dalla superficie piana in un secondo e viene espressa in *hertz* (Hz); il tempo necessario a compiere uno di questi cicli è detto *periodo* e viene indicato con il simbolo T . Risulta intuitivo quindi capire che *frequenza* e *periodo* siano legati dalla relazione seguente:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

Se la frequenza del fenomeno è compresa tra 20 e 20000 Hz , la perturbazione è percepibile dall'orecchio dell'uomo e si parlerà di fenomeno acustico o sonoro. Un suono caratterizzato da una funzione di variazione di pressione sinusoidale a *frequenza* costante, come quello dell'esempio, è detto *tono puro*. I rumori presenti in natura invece sono formati da varie componenti tonali pure sovrapposte. Queste onde sovrapposte concorreranno quindi nel formare una *forma d'onda* complessa che avrà frequenza proporzionale alle frequenze componenti.

<i>Materiale</i>	<i>Densità ρ [kg/m³]</i>	<i>Velocità del suono c [m/s]</i>
Acciao	7800	5000
Alluminio	2700	5820
Calcestruzzo	2000 ÷ 2600	3500 ÷ 5000
Gomma	1010 ÷ 1250	35 ÷ 230
Legno	400 ÷ 700	3300
Marmo	2600	3800
Mattoni pieni	2100	3600
Piombo	11300	1260
Rame	8900	4500
Sabbia	1600	1400 ÷ 2600
Stagno	7280	4900
Sughero	240	480
Vetro	2300 ÷ 5000	4000 ÷ 5000
Zinco	7100	3750

Tabella 2.1: Velocità del suono in alcuni mezzi (fonte:).

Il nostro orecchio è particolarmente abile nel percepire le variazioni di frequenza e le relazioni tra le varie componenti frequenziali presenti in un suono. Queste componenti vengono dette *armoniche*. Se le armoniche sono multiple intere le une delle altre allora si avrà un effetto musicale piacevole detto *consonanza*, in caso contrario si otterrà un suono poco armonioso (addirittura in certi casi dall'altezza indeterminata) detto *dissonanza*.

2.2.2 Velocità di propagazione e lunghezza d'onda

Le proprietà elastiche e la massa del mezzo fluido stabiliscono la *velocità* con cui la perturbazione si trasmette. Chiamando c la questa velocità di propagazione dell'onda acustica sono riportate nella tabella 2.1 alcune velocità in differenti mezzi elastici.

Tenendo come riferimento sempre l'esempio di Figura 2.1, definiamo come *lunghezza d'onda* λ la distanza tra due picchi di compressione del mezzo elastico.

Perciò fissata la frequenza f del moto armonico del pistone, λ dipende dal valore della velocità c_0 secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (2.2)$$

2.3 Onde acustiche

I fenomeni acustici consistono essenzialmente di una perturbazione di pressione che si propaga in un mezzo in equilibrio. Ciò che caratterizza il fenomeno è l'entità di questa perturbazione rispetto a un valore di equilibrio preso come riferimento. Nel caso applicativo più frequente, la propagazione nell'aria, si prende come riferimento la pressione atmosferica.

Essendo P_0 la pressione di riferimento del mezzo, la *pressione acustica istantanea* viene definita come segue:

$$p(t) = p'(t) - P_0 \quad (2.3)$$

dove $p'(t)$ è il valore di pressione atmosferica nell'istante t in un punto dato in cui si vuole misurare la pressione acustica.

2.3.1 La scala dei Decibell

Il valore minimo di perturbazione di pressione p_0 udibile, secondo la definizione ??, è variabile da persona a persona, ma nella normativa viene considerato

$$p_0 = 20 \mu Pa, \quad (2.4)$$

Invece i valori massimi a cui il sistema uditivo viene sottoposto sono dell'ordine delle centinaia di Pa ! Normalmente viene considerata come soglia del dolore

$$P_{max} = 20 Pa, \quad (2.5)$$

ma si pensi che alcuni rumori della vita quotidiana superano di gran lunga questa soglia. Sono stati riportati nella tabella 2.2 alcuni valori di pressione in Pascal relativi a suoni comuni.

<i>Evento sonoro</i>	<i>Variazione di pressione</i> [Pa]	<i>Livello di pressione</i> (SPL) [dB]
Jet militare al decollo, 50m	200	150
Arma da fuoco, 3m	63	130
Concerto rock, 2m	20	120
Motosega, 1m	14	117
Passaggio di un Aeroplano	6,3	110
Clacson, 7m	2	100
Metropolitana, interno	1	94
Strada trafficata, 1m	$2 \cdot 10^{-1}$	80
Automobile, interno	$6 \cdot 10^{-2}$	70
Conversazione	$2 \cdot 10^{-2}$	60
Ambiente casalingo	$2 \cdot 10^{-3}$	40
Stormire delle foglie	$2 \cdot 10^{-4}$	20
<i>Soglia di udibilità</i>	$2 \cdot 10^{-5}$	0

Tabella 2.2: Valori di pressione e di SPL relativi a alcuni suoni comuni.

Dunque è evidente che la dinamica a cui è sottoposto l'apparato acustico umano, e che quindi è necessario misurare, è molto ampia. Infatti:

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{200 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} = 10^7 \quad (2.6)$$

Per evitare quindi di utilizzare sette ordini di grandezza, nonché per rispettare le proprietà di non linearità della risposta dell'apparato acustico umano¹, viene introdotta la scala logaritmica dei *decibell*. Data una grandezza da misurare G e un suo valore di riferimento g_0 rispetto al quale effettuare la misura si definisce il *decibell* (dB) come:

$$grandezza \text{ in dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{G}{g_0}\right) \quad (2.7)$$

Perciò il dB non rappresenta un'unità di misura ma semplicemente una scala logaritmica con cui rappresentare il valore. La scala dei decibel può quindi essere applicata a qualunque grandezza. Nel momento in cui essa viene applicata alla

¹Vedi sezione 2.4.1

variazione di pressione di un suono si parla di *Livello di Pressione* (o *Sound Pressure Level SPL*).

2.3.2 livello di pressione

Quasi mai in acustica si fa riferimento alla pressione direttamente in Pascal, si usa piuttosto misurare in dB e, per dare un significato energetico alla misura, si usa considerare il quadrato del valore di variazione di pressione. Si definisce quindi il *livello di pressione acustica* L (o SPL: Sound Pressure Level):

$$L = \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) dB, \quad (2.8)$$

o più comunemente

$$L = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) dB, \quad (2.9)$$

dove p_0 sia il valore di pressione di riferimento per l'atmosfera, scelto dal sistema internazionale uguale a $20 \mu Pa$ che corrisponde alla soglia di udibilità a $1000 Hz$ ²

2.3.3 Livello equivalente

In applicazioni reali, usualmente ci si trova in presenza di sorgenti con un valore *SPL* non costante nel tempo di cui occorre valutare la *rumorosità*. Descrivendo il fenomeno sonoro con la funzione matematica che ne regola l'andamento del livello, otteniamo una valutazione precisa in un dato istante. Questo però non ci fornisce un'informazione sulla rumorosità globale. Se ad esempio avessimo una sorgente che si accende ad intermittenza, conoscere esattamente l'andamento del tempo non aiuterebbe nel valutare il livello sonoro che la sorgente produce in un determinato tempo. Si definisce quindi un *livello equivalente* che si calcola come:

$$L_{EQ} = 10 \log\left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt\right) \quad (2.10)$$

Il livello equivalente rappresenta una sorta di media del livello sonoro sul periodo di tempo T considerato. In Figura 2.2 è rappresentato l'andamento

²Per una spiegazione più dettagliata sui livelli sonori si veda l'appendice A.3

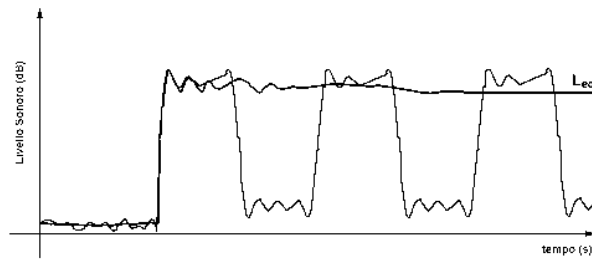


Figura 2.2: Livello sonoro di una sorgente intermittente e relativo livello equivalente L_{eq} .

(quantitativo) del livello emesso da una sorgente intermittente ed il corrispondente livello equivalente:

Come si vede dal grafico, il livello equivalente raggiunge valori sempre più stabili all'aumentare della lunghezza della finestra di integrazione considerata. L'importanza di questo valore misurabile è quella di consentirci di quantificare il livello sonoro complessivo emesso da una sorgente in un determinato intervallo di tempo, attraverso un unico numero. Infatti il livello equivalente è usato nella legislazione come riferimento principale sul quale normare il rumore. In particolare la legge italiana stabilisce tre intervalli di tempo diversi per effettuare le rilevazioni:

dalle 6:00 alle 22:00 corrispondente al periodo diurno.

dalle 22:00 alle 6:00 corrispondente al periodo notturno.

8 ore che corrispondono a una giornata lavorativa. Da utilizzare per normare la rumorosità sul luogo di lavoro.

2.4 Sistema uditivo umano

l'apparato uditivo umano, come si evince dalla Figura 2.3, è molto complesso e composto da moltissimi elementi dalle svariate funzioni, ognuno dei quali influisce sulla percezione acustica in maniera rilevante e addirittura alcuni degli effetti legati alla sensazione uditiva, che vengono chiamati *psicoacustici*, riguardano la sola interpretazione, da parte del cervello, dei segnali elettrochimici provenienti

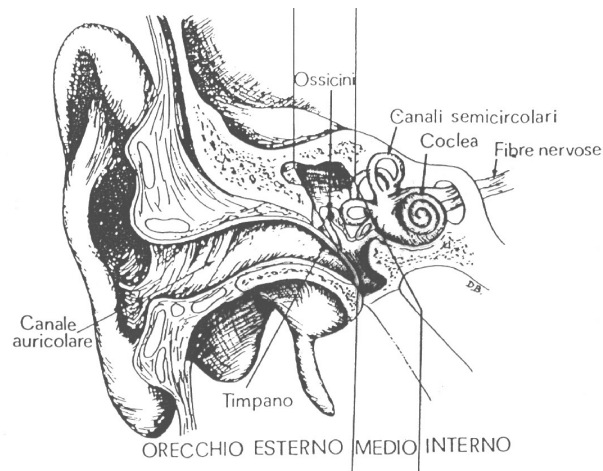


Figura 2.3: Apparato acustico umano.

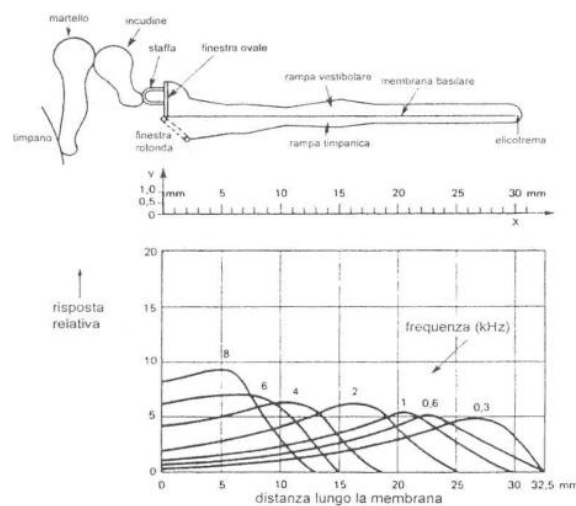


Figura 2.4: Risposta non lineare della coclea

dall'apparato uditivo.

In questa sede ci interessano solamente alcuni effetti di non linearità dell'apparato uditivo, le quali comportano conseguenze fondamentali nelle modalità di analisi di un qualsiasi fenomeno sonoro, quali la descrizione mediante suddivisione in *bande frequenziali* e l'introduzione dei *filtri di ponderazione*, che verranno descritti successivamente.

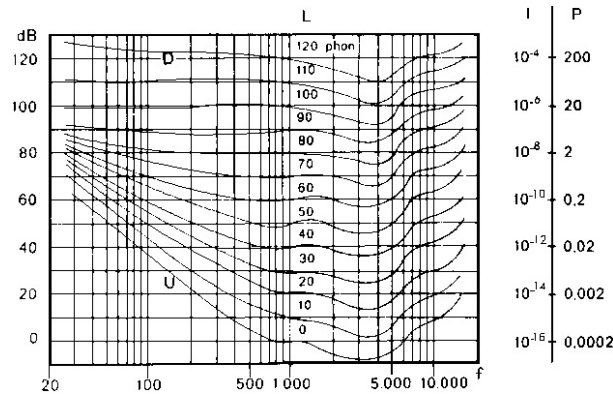


Figura 2.5: Grafico delle curve isofoniche

2.4.1 Effetti di non linearità dell'orecchio umano

Uno degli organi sensoriali principali dell'apparato acustico è la *coclea* rappresentata in Figura 2.4; è lei la responsabile di gran parte degli effetti non lineari di cui discuteremo in seguito.

Sezionando la coclea, si trova una sorta di doppia lamina la quale è caratterizzata da una diversa sensibilità lungo la sua estensione, a seconda delle frequenze di eccitazione del segnale acustico, alla maniera, ad esempio, di una corda o di una frusta. Si osservi nel grafico di figura 2.4 come le basse frequenze interessino la parte terminale mentre le alte frequenze la parte iniziale. Si evince facilmente inoltre che due rumori con bande sovrapposte (in tutto o in parte) si mascherino in modo tale che il segnale di maggiore intensità copra il segnale più debole, a meno che quest'ultimo non abbia una larghezza di banda sufficientemente larga.

Per il sopraccitato ed altri motivi che non approfondiremo in questa sede, il sistema uditivo umano presenta una sensibilità meno accentuata alle frequenze molto basse (poche decine di Hz) ed a quelle elevate (oltre i $15kHz$). Inoltre per procurare la stessa *sensazione sonora* (che si misura in *phon*) occorrono, a frequenze diverse, livelli di pressioni sonore diverse, allo stesso modo suoni di stessa intensità ma frequenza diversa vengono percepiti dall'orecchio in modo diverso³. Tutti questi effetti sono osservabili nel grafico in Figura 2.5.

Essendo dunque tutto il sistema uditivo umano molto soggetto, nella sua risposta all'eccitamento acustico, alla frequenza dell'onda incidente, è spesso comodo

³Si veda [3] al capitolo 2.

analizzare i fenomeni acustici solo per alcune *bande* di frequenza.

2.4.2 Bande frequenziali

La descrizione della composizione in frequenza dei segnali sonori può essere condotta valutando il contenuto di energia sonora all'interno di prefissati intervalli di frequenze, le *bande di frequenza*. Ciascuna banda è caratterizzata da una frequenza di taglio superiore f_s e da una frequenza di taglio inferiore f_i . L'analisi in frequenza può essere di due tipi:

analisi a banda costante: se $\Delta f = f_s - f_i = \text{costante}$ cioè suddivisione a bande frequenziali di uguale larghezza. Tipicamente impiegata per analisi approfondite della composizione in frequenza. Solitamente viene usata per misure nel campo delle vibrazioni delle strutture o delle macchine. Viene ottenuta con una tecnica di elaborazione matematica detta FFT (Fast Fourier Transform)⁴

analisi a banda percentuale costante da 1/1 o 1/3 di ottava: se la larghezza di banda Δf è una percentuale costante del valore della frequenza nominale di centro-banda che caratterizza la banda stessa.

Si parla di *ottave* (bande da 1/1 di ottava) nel caso di $f_s = 2 \cdot f_i$.

Si parla invece di *terzi d'ottava* (bande da 1/3 d'ottava) se $f_s = 2^{1/3} f_i$.

Tipicamente impiegata per misure acustiche. Possono essere usati “banchi” di 10 filtri (ottave) o 30 filtri (terzi), ottenuti con circuiti analogici o digitali (filtri IIR)

Nella Tabella 2.3 sono definite le diverse bande e relative frequenze di centro-banda per le due diverse analisi descritte.

2.4.3 Filtri di ponderazione

come descritto nel paragrafo 2.4.1, la sensibilità dell'orecchio varia al variare della frequenza. Per tale motivo il livello di pressione *SPL* che misuriamo in realtà

⁴si veda il capitolo ??

Bande di 1/1 ottava			Bande di 1/3 ottava		
<i>Frequenza limite inferiore</i>	<i>Frequenza di centro banda</i>	<i>Frequenza limite superiore</i>	<i>Frequenza limite inferiore</i>	<i>Frequenza di centro banda</i>	<i>Frequenza limite superiore</i>
11	16	12	14,1	16	17,8

Tabella 2.3: Definizione delle diverse bande e relative frequenze di centro-banda per le due diverse analisi descritte.

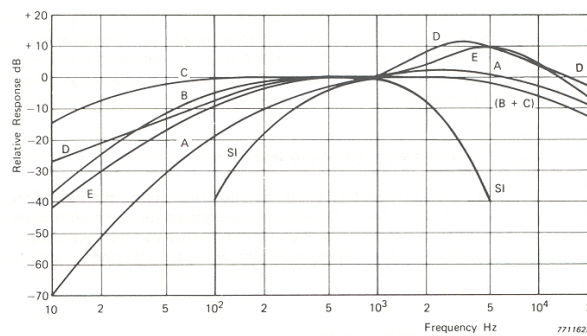


Figura 2.6: Grafico delle curve di ponderazione

non corrisponde a una reale sensazione acustica, cioè variazioni del valore di SPL non necessariamente corrispondono a uguali variazioni nella percezione acustica (variazioni di *volume*). Per rendere più aderente alla sensazione umana e quindi rendere più intuitiva la misura di un fenomeno sonoro, occorre utilizzare dei filtri di pesatura o *ponderazione*. Quelli attualmente utilizzati sono rappresentati in Figura 2.6. Analizzando il grafico notiamo le curve più importanti⁵:

filtro di ponderazione “A” : il più comunemente impiegato e il cui andamento si conforma alla risposta dell’orecchio umano a livelli medio-bassi. Il livello misurato con la ponderazione del filtro *A* viene chiamato $dB(A)$.

filtro di ponderazione “C” : impiegato per rumori molto forti o esplosioni misurate quindi in $dB(C)$.

⁵Per un approfondimento sulle curve di ponderazione si veda l’appendice A.4

Capitolo 3

Array microfonici

Nel presente capitolo verranno presentati i tre diversi tipi di array microfonici presi in considerazione e sui quali questa tesi è stata collaudata.

Sferico: array microfonico costituito da 32 capsule omnidirezionali poste uniformemente su una sfera

Cilindrico: array microfonico

Planare: array microfonico

3.1 Array sferico: Eigenmike

3.2 Array cilindrico

3.3 Array planare

Capitolo 4

Sintesi di microfoni virtuali

[...]

4.1 Elaborazione dei segnali microfonici

cap 1.5 chiesi [...]

4.2 Sistema di Elaborazione

cap 1.4.1 chiesi [...]

4.3 Implementazione del calcolo convolutivo

[...]

Capitolo 5

Ambiente di Sviluppo: l'host Audacity

[...]

5.1 Libreria per la costruzione di interfacce grafiche *WxWidgets*

cap 3,3 novak [...]

5.2 Altre librerie

cap 3,4 novak [...]

5.3 Libreria per elaborazione audio-video: *ffmpeg*

[...]

Capitolo 6

Dettagli di Implementazione

In questo capitolo si analizzeranno i dettagli del lavoro computazionale sotto il tracciamento della mappa. La spiegazione del lavoro svolto seguirà i seguenti step:

1. sintesi dei microfoni virtuali mediante convoluzione;
2. scalatura delle ampiezze dei segnali risultanti in funzione del fondo scala specificato nella finestra di configurazione;
3. mirroring dei microfoni virtuali, per garantire la continuità ai bordi della mappa;
4. copertura dell'intera area della mappa con superfici di forma triangolare (meshing);
5. interpolazione dei dati ed il filtraggio in bande d'ottava;
6. applicazione della scala colorata in relazione alla presenza o meno della funzione di auto-scaling.

Nei capitoli precedenti si è già analizzato lo step della sintesi dei microfoni virtuali mediante convoluzione (punto 1). Si procederà di seguito con la spiegazione in dettaglio degli altri cinque passaggi.

6.1 Elaborazione numerica del suono

[lezione 12 ppt]

[...]

6.2 Acquisizione del video

[...]

6.3 Livello di fondo scala

Il livello di fondo scala (FS) specificato dall'utente tramite la finestra di configurazione del plug-in, è inteso come livello massimo considerato dei segnali ottenuti dalla sintesi per convoluzione dei microfoni virtuali. Per imporre il FS desiderato non è sufficiente una semplice amplificazione o attenuazione dei segnali di uscita, in quanto l'utente potrebbe aver selezionato uno spezzone casuale del segnale registrato, che quindi potrebbe non comprendere la regione di audio che causa il raggiungimento del livello di FS da parte dei segnali risultanti dalla convoluzione. Per tenere conto di tale possibilità, si utilizza un algoritmo che svolge le seguenti funzioni:

1. determina su quale canale n del progetto Audacity® si ha il picco massimo di ampiezza tra tutti i canali registrati e ne memorizza il valore ABS_{MAX-dB} ;
2. determina il picco massimo di ampiezza dello stesso canale n , considerando solo il segnale entro la selezione, e ne memorizza il valore REL_{MAX-dB} ;
3. determina il nuovo livello di FS corretto sfruttando la relazione:

$$FS_{FIX_{dB}} = FS_{USER_{dB}} - ABS_{MAX-dB} - REL_{MAX-dB} \quad (6.1)$$

In tal modo, il livello di FS specificato dall'utente sarà riscalato in relazione al rapporto tra l'ampiezza massima assoluta del segnale, cioè quella determinata

lungo la sua intera durata, e l'ampiezza massima relativa allo spezzone selezionato. Grazie all'introduzione di questo algoritmo il *plug-in* non deve calcolare l'intera convoluzione per poi, dopo aver applicato la correzione del FS, doverne scartare la maggior parte, ma viene svolta l'analisi solo sullo spezzone desiderato (??).

6.4 *Mirroring* dei microfoni virtuali

La registrazione effettuata con un array sferico non produce una mappa dei livelli sonori come proiezione cilindrica di una mappa sferica, come ad esempio una mappa ottenibile con un procedimento simile a quello usato per la rappresentazione della superficie terrestre sul planisfero. Muovendo dall'esempio del planisfero, è noto che, essendo la terra sferica, muovendosi lungo i bordi del planisfero si avrà una certa continuità della mappa, ovvero uscendo da nord si rientrerà da sud, uscendo da est si rientrerà da ovest etc. Nel caso particolare di tracciamento della mappa sonora, si è proceduto prolungando la mappa stessa oltre i propri bordi. Per fare ciò si è effettuata una estensione della mappa *specchiando* i punti relativi ai microfoni virtuali sintetizzati seguendo lo schema proposto da Binelli, Venturi, Amendola e Farina nel documento [1] e riportato in Figura 6.1.

Dalla figura si osserva che i quattro quadranti in cui può essere scomposta la fotografia sferica, A, B, C e D, debbano essere *copiati e specchiati* verticalmente e/o orizzontalmente attorno alla fotografia, per imporre la condizione di continuità; più precisamente si è proceduto copiando le posizioni e i livelli registrati dai microfoni virtuali in modo da riuscire a coprire con delle *mesh* triangolari anche i bordi della mappa, così come meglio spiegato nel prossimo paragrafo.

6.5 *Meshing* della superficie mediante l'operazione di triangolazione di *Delaunay*

Per eseguire l'interpolazione di una serie di livelli noti di una funzione in due variabili, l'ascissa e l'ordinata, occorre suddividere l'intero piano in aree più piccole di forma poligonale, aventi come vertici tre o più coppie di coordinate in cui i

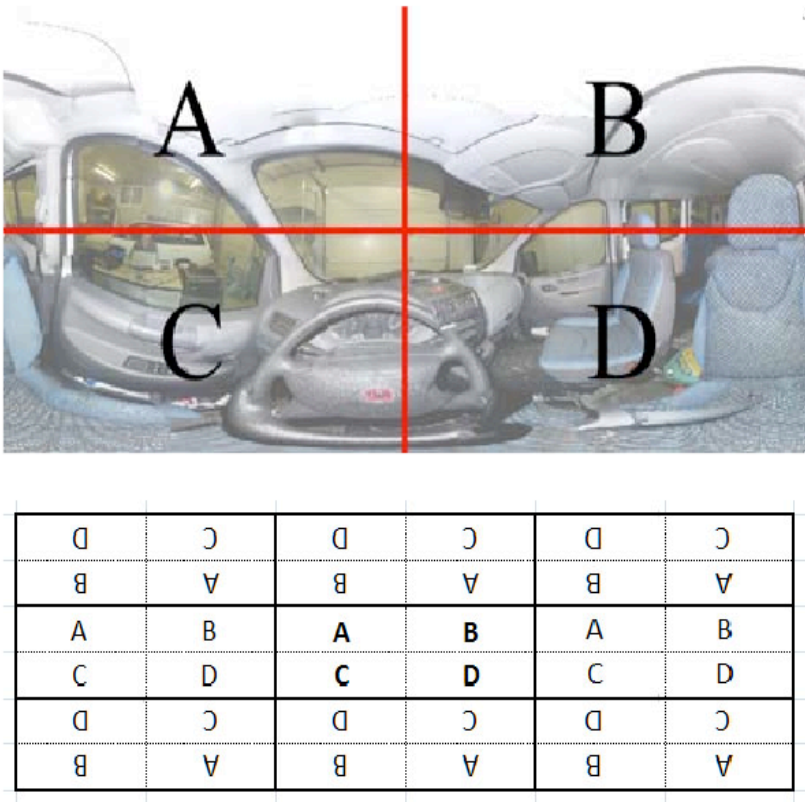


Figura 6.1: Rappresentazione schematica del processo di *mirroring*, necessario a garantire la continuit  ai bordi della mappa.

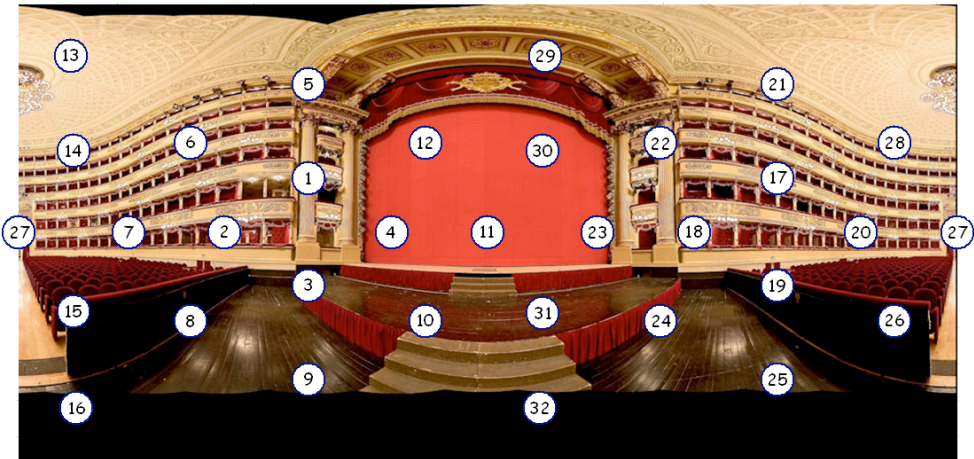


Figura 6.2: Direzioni di puntamento delle capsule dell'Eigenmike sovrapposte ad una foto panoramica del Teatro alla Scala di Milano, svolta secondo lo schema di proiezione visto nella sezione 6.4.

livelli siano noti; occorre poi ipotizzare, per ciascuna di queste aree, che i livelli ai vertici facciano tutti parte di un'unica funzione notevole, ed infine calcolare i valori che tale funzione assume in tutti i punti compresi quelli di ognuna delle sottoaree in cui si è suddivisa la superficie. Questo primo passaggio è detto *meshing* della superficie, mentre le sottoaree che vanno a ricoprire l'intera superficie prendono il nome di *mesh*.

Il primo passo da fare è stabilire il metodo da seguire per determinare la griglia, ovvero la forma geometrica delle *mesh* in cui l'intero piano xy andrà suddiviso. La prima ipotesi potrebbe essere la suddivisione in aree di forma quadrata (come i meridiani e i paralleli del planisfero): questa ipotesi è valida se i microfoni virtuali, che costituiscono la griglia dei punti in cui i livelli sonori sono noti, sono disposti su una griglia uniforme.

Come si può notare dalla Figura 6.2, le posizioni delle capsule dell'Eigenmike® purtroppo non lo sono, e se anche così fosse, lo sviluppo del plug-in sotto l'ipotesi di griglia uniforme avrebbe portato alla realizzazione di un software utilizzabile per un numero limitato di disposizioni dei microfoni virtuali.

La seconda ipotesi è quella di suddividere l'intero piano xy in superfici di forma triangolare; in questo modo, anche nel caso in cui le posizioni dei microfoni fossero disposte nella maniera più casuale possibile, si potrà sempre determinare un insieme continuo di triangoli che copra l'intera superficie. Infatti Nel 1925 è stato dimostrato che ogni superficie può essere triangolata ma questo può richiedere un numero infinito di triangoli. Per effettuare questa operazione si è scelto quindi di utilizzare una triangolazione particolare detta di *Delaunay* che è definita come segue:

Una triangolazione di un insieme finito di punti $P \subset R^2$ viene detta di Delaunay se il cerchio circoscritto ad ogni triangolo è vuoto, ovvero nessun punto di P vi giace all'interno.

Sono diversi gli algoritmi che consentono di determinare, dato un insieme di punti sparsi su un piano, la triangolazione di Delaunay. I principali, con complessità differente in funzione del numero di punti da triangolare, sono:

- l'algoritmo incrementale;
- l'algoritmo dividi et impera;

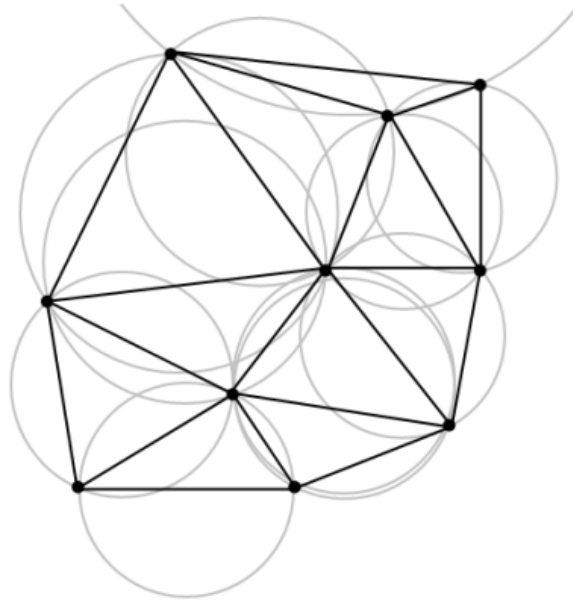


Figura 6.3: Descrizione della proprietà dei triangoli formati con l'algoritmo di *Delaunay*.

- l'algoritmo Convex Hull.

Per il presente lavoro di tesi si è deciso di utilizzare una libreria esterna, denominata Triangle++, per implementare l'algoritmo di *Delaunay*, essendo l'implementazione particolarmente impegnativa. Triangle++ è il nome del wrapper C++ della libreria C *Triangle*¹; esso fornisce la definizione di una classe molto semplice da utilizzare, la quale, dato un insieme di punti di cui si vuole conoscere la triangolazione, svolge autonomamente il calcolo delle mesh facendo uso di tutti e tre gli algoritmi sopracitati.

6.6 Interpolazione dei valori acquisiti e filtraggio in bande d'ottava

Quando si sia calcolata una ipotetica partizione del piano xy in *mesh* di forma triangolare, all'interno di ciascuna delle quali ci interessi conoscere i valori assunti dalla funzione incognita dei livelli sonori, occorre scegliere, tra le tante possibili,

¹Si veda [5]

6.6. Interpolazione dei valori acquisiti e filtraggio in bande d'ottava²³

una e una sola funzione da utilizzare come stima approssimativa di quella incognita, imponendo che soddisfi i livelli noti presenti ai tre vertici della mesh. La soluzione più semplice è quella di scegliere come funzione approssimante l'equazione di un piano passante per tre punti generici. Il metodo di interpolazione che ne deriva va sotto il nome di *interpolazione bilineare*.

Sapendo che l'equazione generica di un piano può essere scritta nella forma:

$$z = A \cdot x + B \cdot y + C \quad (6.2)$$

e chiamando (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) , (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) e (x_{3i}, y_{3i}, z_{3i}) le coordinate degli unici tre punti noti della funzione incognita dei livelli sonori, dove i valori z_{1i} , z_{2i} e z_{3i} corrispondono proprio ai livelli misurati in corrispondenza dei tre vertici della i -esima mesh, l'imposizione del passaggio del piano per i tre punti corrisponde all'equazione matriciale:

$$\begin{pmatrix} x_{1i} & y_{1i} & 1 \\ x_{2i} & y_{2i} & 1 \\ x_{3i} & y_{3i} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{1i} \\ z_{2i} \\ C \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

L'equazione 6.3 rappresenta esattamente l'approccio utilizzato dalla classe *TriangularMesh*, definita all'interno del codice del *plug-in* progettato, per il calcolo dei coefficienti A , B , C e $\det(M)$ che servono per l'interpolazione. Quando si desidererà conoscere il livello sonoro in una certa posizione di coordinate (in pixel) che cadono entro una certa *mesh*, si dovrà chiamare la funzione membro dell'oggetto che rappresenta la *mesh* di interesse e che, implementando la 6.3, ci restituirà il valore interpolato.

Questa ipotesi sarebbe corretta nel caso in cui ad ogni vertice di ciascuna mesh fosse possibile associare un unico livello sonoro, ma ciò non può avvenire. Come si è visto nel precedente capitolo

(verificare)

, infatti, il *plug-in* consente di effettuare una analisi in bande d'ottava² dei livelli sonori ovvero si avranno non una sola mappa dei livelli, bensì tante mappe quante sono le possibili bande d'ottava selezionabili. Per risolvere occorre usare

²si veda la sezione 2.4.2

come terza coordinata di ciascun vertice il numero del microfono virtuale posizionato nelle stesse coordinate del vertice (anzichè il livello sonoro) e memorizzare una matrice dei livelli sonori tale che, incrociando il numero del microfono virtuale con il numero identificativo della banda selezionata, fornisca il livello sonoro corretto per la determinazione dei coefficienti A , B , C e $\det(M)$ necessari per la costruzione della mappa della particolare banda selezionata. Il processo di filtraggio è stato affrontato in modo trasparente grazie all'utilizzo di una classe già progettata per la suite di plug-in *Aurora* per Audacity®³ la quale già disponeva di tutte le funzioni membro necessarie ad implementare i filtri in bande d'ottava, come definiti secondo norma IEC-1260. Infine, dopo l'operazione di filtraggio, è necessario creare un *frame audio* cioè una mappa statica che rappresenti il contenuto del campo acustico nell'intervallo non infinitesimo di un frame⁴ del video che si sta andando a costruire; occorre qui un calcolo del valore RMS ⁵ dei segnali filtrati.

6.7 Mappatura con scale cromatiche e *auto-scaling*

La scala di colore che si utilizza è una funzione in una incognita a tre variabili dipendenti: l'incognita è il livello sonoro in un dato punto ed i tre valori di uscita della funzione coincidono con i tre canali R (*red*), G (*green*) e B (*blue*) di una interfaccia video. A seconda della scala di colore disiderata, sarà utilizzata una *routine* diversa per determinare il valore RGB del pixel interessato, il quale sarà successivamente inserito in una *mappa RGB* (una bitmap, appunto). Per assegnare ai valori di SPL un valore RGB è necessario stabilire gli estremi SPL da rappresentare per poi successivamente effettuare tutta la scalatura tra i livelli in modo proporzionale. Infatti le relazioni tra i valori R , G e B e il livello che si vuole mappare sono parametrizzate in funzione dei valori di minimo e massimo rappresentabili. Non si tratta di un'operazione banalissima in quanto per definire univocamente questi valori è necessario analizzare tutto il video alla ricerca degli estremi. Questo comporta la perdita della possibilità di lavorare in tempo reale

³si veda [2]

⁴selezionato dall'utente come al paragrafo ??

⁵si veda l'appendice (da scrivere e da controllare se è la prima citazione-noncredo-) ??

con una registrazione (a meno di accontentarsi di approssimazioni⁶), sarà invece necessario analizzare un audio pre-registrato. Dopo aver calcolato tutti i livelli corrispondenti ai microfoni virtuali, filtrati per ogni banda, ed effettuata questa operazione per ogni singolo frame⁷, il programma è in grado di ottenere e salvare in una struttura dati i valori di *SPL* massimi e minimi per ogni banda e per ogni frame. In questo modo sarà possibile individuare gli estremi cercati.

Con la funzione di *auto-scaling* si modificano i valori minimi e massimi entro i quali verrà adattata la scala colorata in base alla banda frequenziale selezionata dall'utente.

Nel caso in cui sia stata abilitata la funzione *auto-scale*⁸, saranno modificati i valori *RMS* di minimo e massimo dei segnali prodotti dai microfoni virtuali limitando la ricerca in ogni frame ai soli valori riguardanti la banda selezionata; se il livello minimo così calcolato dovesse essere inferiore a quello di soglia stabilito dall'utente⁹, si considererà come valore minimo il valore di soglia.

Nel caso in cui invece la funzione *auto-scale* sia disabilitata, il livello minimo verrà assunto pari a quello di soglia inserito dall'utente, mentre quello massimo verrà assunto pari al massimo assoluto tra i livelli *RMS* prodotti dai vari microfoni virtuali in tutte le bande e fra tutti i singoli frame del video di output.

6.8 Esportazione dei risultati

[...]

⁶si potrebbe per esempio...

⁷cioè in seguito al precalcolo descritto in questo capitolo

⁸con il *checkbox* descritto nella sezione ??

⁹si veda il paragrafo 7.1

Capitolo 7

Descrizione plug-in: un manuale d'uso

[...]

7.1 Configuration Dialog

[...]

7.2 Interfaccia

[...]

7.3 Selezione dell'intervallo temporale da analizzare

[...]

Capitolo 8

Conclusioni

Il plug-in progettato in questa sede è funzionante ed altamente interattivo, con svariate tipologie di realizzazione della mappa grazie alla possibilità di configurare lo stile della scala di colore, la percentuale di trasparenza della mappa sovrapposta al video di background, l'unità di misura dei livelli mostrati, i valori di fondo scala, la lunghezza del frame video, la percentuale di overlap tra i singoli frame etc.). Dal confronto degli output del modulo in oggetto con altre calcolate dallo script Matlab® descritto nel documento [1] si è inoltre riscontrata una certa coerenza tra i risultati ottenuti; ben sapendo che non è ancora stato scoperto un metodo realmente applicabile per tarare una misura effettuata con un array microfonico, si desume che i risultati ottenuti con l'uso del *plug-in* siano corretti.

figura delle tre piattaforme

[...]

Figura 8.1: Graphic User Interface sotto le tre diverse piattaforme principali: *Windows*, *Mac OS X* e *Linux*.

Appendice A

Appendice

In questa appendice finale si trovano tutte le definizioni teoriche indispensabili alla comprensione dell'elaborato qui presentato ma il cui studio è considerato prerequisito e quindi noto. Viene dunque riportato un breve riassunto delle nozioni fondamentali in modo da fornire un quadro generale ristretto ma comunque sufficiente per affrontare serenamente la lettura.

A.1 Propagazione di onde sonore

Un'onda sonora¹, come risaputo, è una perturbazione della pressione atmosferica avente la proprietà di propagarsi; affinché questo possa avvenire occorrono due elementi indispensabili: una causa ed un mezzo. Il primo potrà essere un sistema meccanico oscillante con sufficiente frequenza², mentre il secondo è, in generale, un fluido, di norma l'aria.

La descrizione fisica della propagazione delle onde suddette avviene tramite 3 leggi fondamentali che di seguito si riassumono:

L'equazione di Eulero. Siano p la pressione sonora, \mathbf{u} il vettore velocità istantanea di una particella di fluido e ρ_0 la densità dell'aria in condizioni normali, allora si ha:

¹Vedi [4], capitolo 3.

²Un'onda di pressione perché venga percepita dall'apparato uditivo umano deve avere frequenza compresa tra 20 Hz e 20000 Hz circa, a seconda dell'individuo.

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}. \quad (\text{A.1})$$

La relazione A.1 altro non è che l'equivalente fluidodinamico della seconda legge newtoniana della dinamica, da cui deriva, ed esprime in sostanza le condizioni di equilibrio dinamico delle forze agenti su un elemento di fluido.

L'equazione di continuità. Se si esprime con δ la variazione relativa di densità, o *condensazione*³, del mezzo e con \mathbf{s} il vettore spostamento, per un generico elemento di fluido vale la legge

$$\delta = -\nabla \cdot \mathbf{s}, \quad (\text{A.2})$$

che sintetizza il principio secondo cui il flusso netto di massa, ossia la differenza tra quello entrante e quello uscente, deve essere uguagliato dalla variazione di massa di fluido contenuta dall'elemento.

L'equazione di stato termodinamico. Ipotizzando ragionevolmente variazioni di stato talmente rapide da poter essere ritenute adiabatiche ed indicando con p_0 il valore della pressione sonora a riposo e con γ il rapporto tra i calori specifici del gas, rispettivamente, a pressione e volume costante, il comportamento termodinamico del fluido in questione è dato da

$$\frac{1}{p_0} \frac{\partial p}{\partial t} = \gamma \frac{\partial \delta}{\partial t}. \quad (\text{A.3})$$

Dalle relazioni A.1, A.2 e A.3, dopo qualche passaggio, si ricava l'*equazione di propagazione delle onde sonore*:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (\text{A.4})$$

in cui c è la velocità di propagazione dell'onda sonora nel gas, definita come

³È data da

$$\delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$$

dove ρ è densità dell'elemento di fluido considerato.

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}. \quad (\text{A.5})$$

A.2 Intensità, densità di energia e potenza

Di seguito si riportano le definizioni di alcune grandezze fondamentali⁴:

Intensità sonora. È la quantità di energia che fluisce, nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. L'*intensità istantanea* è data da

$$I = p_m u_m \cos^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (\text{A.6})$$

dove p_m e u_m sono i valori di picco di pressione e velocità relative alla direzione di propagazione considerata, mentre l'*intensità media* dalla relazione

$$\bar{I} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (\text{A.7})$$

La quasi totalità delle sorgenti reali, però, non irradia energia uniformemente in tutte le direzioni, tale caratteristica viene misurata da una grandezza denominata *direttività* ed indicata con Q ; si ha

$$Q = \frac{I_{\theta, \phi}}{\bar{I}}, \quad (\text{A.8})$$

dove $I_{\theta, \phi}$ è l'intensità irradiata nella direzione specificata, in coordinate sferiche, dagli angoli θ e ϕ .

Densità di energia sonora. È l'energia contenute in un'unità di volume del mezzo ed è data da

$$D = \frac{\bar{I}}{c^2} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c^2} \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]. \quad (\text{A.9})$$

⁴Per i dettagli si rimanda sempre a [4].

Potenza sonora. Supponendo che tutta l'energia sonora fluente nel mezzo sia prodotta da una sola e ben identificabile sorgente, l'energia irradiata nell'unità di tempo da quest'ultima rappresenta la sua potenza sonora W . Se S è una superficie immaginaria inviluppante la sorgente ed I_S l'intensità sonora rilevata su un area elementare dS della superficie, risulta

$$W = \int_S I_s dS. \quad (\text{A.10})$$

A.3 Livelli sonori

Per via dell'enorme capacità dinamica dell'orecchio umano difficilmente viene adottata la scala lineare per rappresentare le grandezze acustiche: dovendo trattare con un campo di valori estremamente esteso e disperso⁵ è universalmente preferita la scala dei decibel, codificata nella norma ISO 1648. Premettendo che un valore espresso in decibel implica *sempre* un rapporto con un altro valore di riferimento, di seguito si riportano le principali grandezze impiegate:

Livello di pressione sonora.

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = \\ &= 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}], \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

dove $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. La A.11 si può anche riscrivere nel seguente modo, dopo aver sostituito il valore di p_0 :

$$L_p = 10 \log p^2 + 94 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.12})$$

Livello di potenza sonora.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.13})$$

dove $W_0 = 1 \text{ pW}$. Sostituendo quest'ultimo valore nella A.13 si ricava

⁵La minima pressione percepibile da un individuo normo udente è di $20 \mu\text{Pa}$, la soglia del dolore è, invece, attorno ai 60 Pa .

$$L_W = 10 \log W + 120 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.14})$$

Livello di intensità sonora.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.15})$$

dove $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$. È largamente in uso esprimere anche la direttività in decibel: in questo caso il parametro definito dall'equazione A.8 prende il nome di *Directivity Index* ed è così definito

$$\begin{aligned} DI &= 10 \log Q = \\ &= L_{I_{\theta,\phi}} - L_{\bar{I}}. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Se $\rho_0 c$ vale 400 rayl risulteranno uguali $\rho_0 c I_0$ e p_0^2 , cioè sarà verificata la relazione

$$L_I = L_p. \quad (\text{A.17})$$

Tale situazione si avrebbe a pressione atmosferica e temperatura di 39°C; alla temperatura di 20°C il valore dell'impedenza acustica sale a 415 rayl, tuttavia l'errore commesso applicando ugualmente la A.17 è comunemente ritenuto trascurabile.

Se l'intensità sonora I è uniforme su una superficie S che circonda una sorgente di potenza W si può scrivere:

$$10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad [\text{dB}]; \quad (\text{A.18})$$

se, poi, $S_0 = S = 1 \text{ m}^2$, risulta esattamente

$$L_W = L_I. \quad (\text{A.19})$$

A.4 Curve di ponderazione

La sensibilità dell'orecchio umano non è costante in tutta la banda udibile, ma presenta un massimo nella regione attorno a 4 kHz ed ha i valori minimi in corrispondenza degli estremi, come evidenziato dalle curve isofoniche elaborate da Fletcher e Munson.⁶ Questo ha portato all'ideazione delle unità di misura *percettive* (la scala dei *phon*) ed ha suggerito l'adozione negli strumenti di misura di un filtraggio dei livelli rilevati in modo da renderli coerenti alla reale sensibilità umana. Il suddetto filtraggio è codificato nelle cosiddette *curve di ponderazione*, le quali non fanno altro che indicare l'alterazione della risposta in frequenza dello strumento, ossia il fattore con cui debbono essere pesate le frequenze della banda audio. In figura 2.6 sono riportate le curve di ponderazione A, B e C che sono, sostanzialmente, le curve isofoniche a 40, 70 e 100 phon rispettivamente.

A.5 Trasformata di Fourier

L'argomento è enorme, in questa sede se ne vuole solo riportare la definizione operativa. Se $x(t)$ è una funzione

- limitata
- tale da presentare un numero finito di discontinuità
- assolutamente integrabile

allora la sua trasformata secondo Fourier è data dalla relazione

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (\text{A.20})$$

La trasformata inversa del segnale $X(f)$, invece si può calcolare mediante l'equazione

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (\text{A.21})$$

⁶Si veda [3] al capitolo 2.

In generale affinché esista la trasformata di Fourier del segnale $x(t)$, per il teorema di Plancherel è sufficiente che quest'ultimo abbia energia finita, caratteristica, questa, di tutti i segnali fisici.

Bibliografia

- [1] M. BINELLI, A. VENTURI, A. AMENDOLA, E A. FARINA, *Experimental analysis of spatial properties of the sound field inside a car employing a spherical microphone array*, in 130th AES Convention, London (UK), mag. 2011.
- [2] S. CAMPANINI E A. FARINA, *A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module*, in Linux Audio Conference, Parma, Italy, 2009.
- [3] R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Manuale di acustica applicata*, UTET, Torino, Italy, 3 ed., gen. 2005. ISBN 88-7750-710-1.
- [4] S. CINGOLANI E R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Acustica musicale e architettonica*, UTET, Torino, Italy, 1 ed., dic. 2005. ISBN 88-7750-941-4.
- [5] J. R. SHEWCHUK, *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*, in Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, M. C. Lin e D. Manocha, cur., vol. 1148 di *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, mag. 1996, pp. 203–222. From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.

Se proprio devo ringraziare...

Typesetted on 2013 September 27 with L^AT_EX 2_ε