

La ricerca nell'acustica del violino presso la scuola di Liuteria di Cremona

Andreas Langhoff*,**

via Pontaccio 23 , 20121 Milano, Tel.+Fax. +39-2-8051278

* Institute for Safety, Informatics and Systems (ISIS) T.P.210 , C.C.R ,
21020 Ispra (VA), Italy, e-mail:andreas.langhoff@jrc.it

** precedentemente Scuola di Liuteria di Cremona, Corso Garibaldi 178

Abstract

Oggi è necessario che un liutaio abbia delle conoscenze di base nell'acustica del violino. Questo è lo scopo del laboratorio di fisica acustica della scuola di liuteria. Il violino è un oggetto molto complesso, conoscere le sue caratteristiche comporta lo studio di molte discipline. Un problema molto importante è quello di poter memorizzare le caratteristiche timbriche di un violino. La risposta in frequenza è l'impronta digitale del violino, la misura di essa e la sua interpretazione viene descritta. Per facilitare la leggibilità dello spettro acustico, una rappresentazione tridimensionale verrà presentata.

Il progresso dei computer e della digitalizzazione permette di rendere udibile lo spettro acustico del violino. Si possono usare gli stessi concetti usati da Angelo Farina¹ nella simulazione di ambienti acustici anche sul problema del violino. L'utilizzo della convoluzione permette di condurre dei confronti 'virtuali' tra violini diversi, 'virtuali' perché per questi confronti non si fa uso né del musicista né del violino stesso, ma soltanto di registrazioni fatte altrove. Il vantaggio è una perfetta riproducibilità del confronto sonoro.

Infine vengono presentati i risultati di un'analisi modale del violino. Vengono presentati e discusse le forme di vibrazione della cassa del violino fino a 2,5kHz.

1. Introduzione

Gli strumenti ad arco hanno un significato particolare nella musica. Essi sono la base di ogni orchestra sinfonica, si usano sia in musica da camera che come strumento solistico.

Mentre l'Italia è il paese d'origine del violino con i liutai Amati, Stradivari e Guarneri, famosi in tutto il mondo, la ricerca scientifica sull'acustica del violino nasce e si sviluppa in altri paesi: Felix Savart studiò già nel '800 le vibrazioni delle tavole e dei fondi di violini (tra l'altro usava proprio degli strumenti di Stradivari e Guarneri per i suoi esperimenti). Con Helmholtz cominciò un'epoca di studi proficui sul violino in Germania. Tra i più importanti ricercatori di acustica musicale in Germania possiamo nominare J.Meyer e Lothar Cremer. Negli Stati Uniti Frederick Saunders si interessò per primo nell'acustica del violino. Insieme con C.M. Hutchins ed altri fondò la Catgut Acoustical Society. La CAS, oggi, è l'unica organizzazione che si dedica esclusivamente alla promozione della ricerca scientifica ed empirica sul violino, viola e violoncello. In Italia i primi segni di una vita dell'acustica del violino si trovano con i lavori di G. Pasqualini a Roma nel 1946. A Padova si forma nel frattempo un centro di acustica musicale, ma l'acustica del violino viene studiata soltanto recentemente. La Scuola di Liuteria di Cremona ha investito generosamente in apparecchiature per lo studio dell'acustica del violino. Lo stretto contatto con dei musicisti e dei liutai crea un'atmosfera molto stimolante per la ricerca acustica. In seguito verranno presentati alcuni degli studi eseguiti a Cremona. Gli studi di Cremona si integrano molto

bene con il campo d'interesse di Angelo Farina dell'Università di Parma. I risultati di una prima collaborazione con l'Università di Parma (A. Farina) e l'Università di Bologna faranno anche parte di questa relazione sull'acustica del violino.

2. Il Violino, punto d'incontro di tante discipline.

Esaminando il processo di generazione del suono sul violino ci si accorge che ne sono coinvolti molti. I principali componenti sono il musicista, l'arco, le corde, il ponticello , la cassa del violino , la sala e l'ascoltatore. La scelta di questi componenti non è stringente , ma permette di considerare il processo della generazione del suono come una catena: Il musicista fornisce l'energia che lui applica all'arco. L'arco sollecita delle oscillazioni delle corde che a sua volta agiscono come generatore di frequenza. Il ponticello serve come filtro passa basso e ad accoppiare l'energia di oscillazione delle corde della cassa. La cassa del violino è una struttura molto complessa che converte l'energia vibrazionale in pressione acustica. L'ambiente di ascolto ulteriormente modifica l'aspetto sonoro, per non parlare di possibili aspetti psicoacustici dell'ascoltatore.

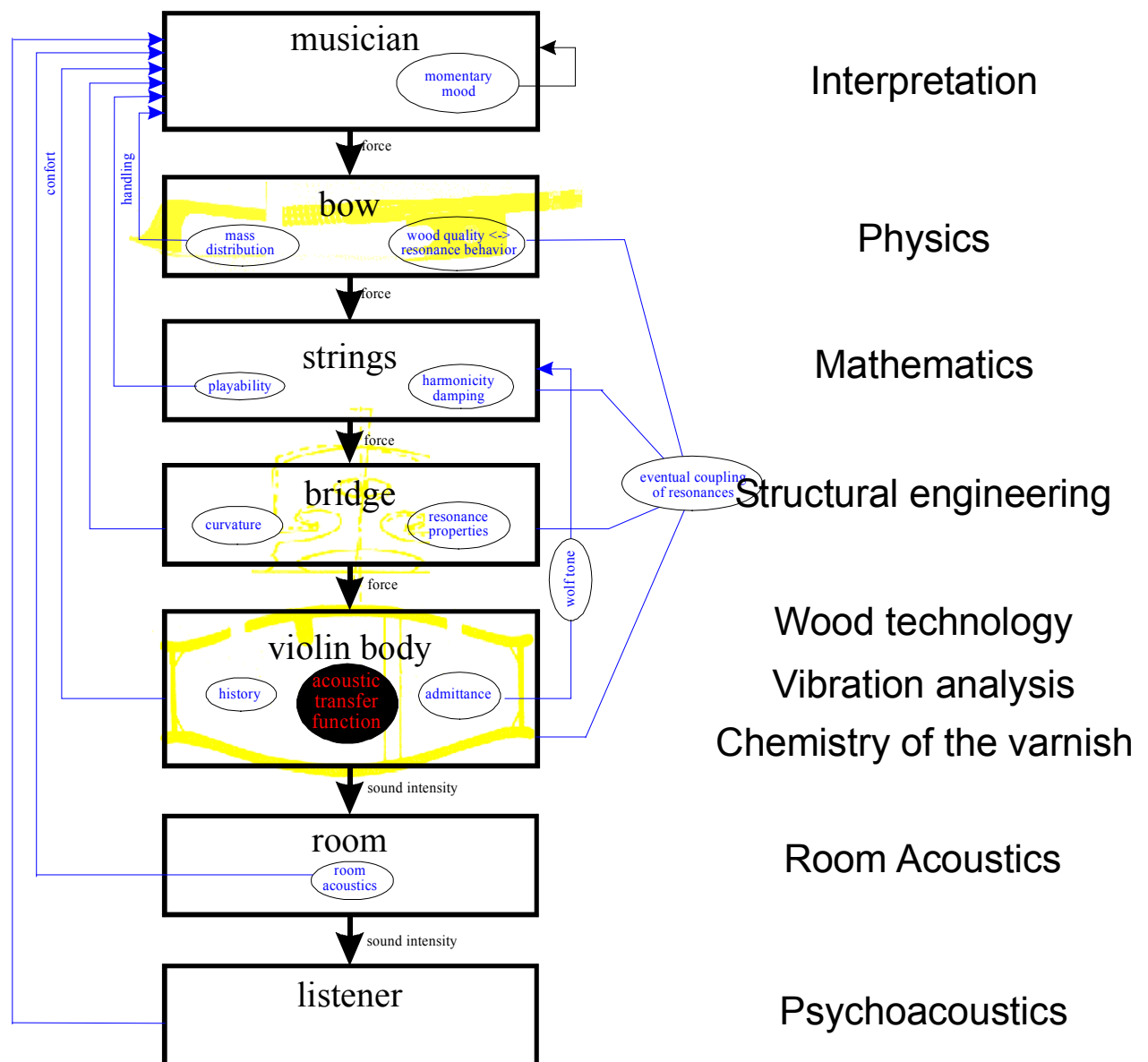


Figure 1. Componenti che contribuiscono alla generazione del suono del violino.

L'insieme di questo sistema in un certo senso non può essere esaminato con metodi scientifici, perché in un giudizio acustico del violino subentrano fattori di tipo estetico e soggettivo. Questi fattori, per definizione della scienza (che dovrebbe essere la ricerca dei parametri oggettivi), non possono essere determinati; il fascino dell'acustica del violino ci fa conoscere i limiti della scienza.

Ognuno degli componenti della catena di generazione del suono di fig. 1. è stato soggetto di numerosi studi scientifici: L'arco è stato studiato da Askenfelt² (un fisico) , in particolare l'influenza del legno sul suono e l'interazione del crine con le corde. La sollecitazione delle corde dall'arco viene tradizionalmente studiato da fisici con inclinazione matematica o da matematici , nel passato si usavano metodi analitici per risolvere le equazioni differenziali (L. Cremer³), oggi soluzioni numeriche e physical modelling sono più potenti (McIntyre e Woodhouse⁴). Misurare il comportamento del ponticello è molto difficile: Il ponticello è troppo piccolo per attaccarci degli sensori. Oggigiorno gli studi basati su simulazioni con elementi finiti (Rogers⁵ ⁶) sono molto promettenti. Già da molto tempo lo spettro acustico viene considerato uno degli aspetti più importanti della cassa del violino (Meinel⁷ 1937). Lo spettro acustico dal punto di vista fisico è l'impronta digitale del suono del violino, ma la sua interpretazione resta difficile. Altri due campi che sono di interesse per la produzione del suono sono l'acustica delle sale e la psicoacustica.

2 Lo spettro acustico del violino

Assumiamo che la cassa del violino abbia un comportamento lineare e che lo spettro acustico descriva il comportamento acustico. Caratteristiche come il timbro, la potenza sonora ed il volume del suono sono descritti dallo spettro acustico (lo spettro acustico però descrive soltanto il comportamento di un sistema lineare e stazionario). È però necessario definire un sistema lineare che corrisponde il più possibile alla realtà, cioè alla situazione che il musicista suona. Il modello più semplice è costituito da due scatole nere : Il primo blocco rappresenta la sorgente di energia del sistema, ed il secondo blocco rappresenta il violino stesso. Figura 2 schematizza questo sistema.

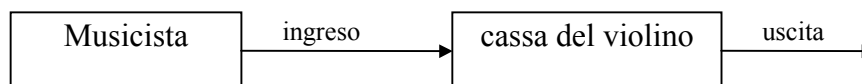


Figura 2. Un sistema lineare molto semplice per descrivere il suonare su un violino.

Questo modello, nonostante la sua semplicità, può essere utilizzato. La difficoltà sta nel misurare sia l'ingresso che l'uscita del violino. L'uscita del violino si può misurare facilmente con un microfono, più difficile da misurare è l'ingresso al violino. Ci sono due difficoltà principali: Quale è il punto di sezione tra violino e musicista? Dopo aver trovato un punto di sezione tra musicista e violino, con quale sensore si può misurare il segnale in questo punto? Due domande sorgono, quindi: Come misurare e come interpretare lo spettro acustico.

2.1 Misura dello spettro acustico del violino

Lo spettro acustico del violino è stato ottenuto usando due metodi differenti. Il primo metodo utilizza un analizzatore di spettro (Bruel&Kjær BK2034) FFT a due canali. L'ingresso e l'uscita vengono misurati contemporaneamente e tramite una FFT si calcolano lo spettro acustico (la risposta in frequenza) e la risposta ad impulso del violino. Una descrizione dettagliata si trova in ⁸. Il secondo metodo non utilizza la FFT per il calcolo dello spettro e

della risposta ad impulso, ma invece è basata sulla tecnica MLS (Maximum Length Sequence). La tecnica MLS è stata sviluppata da Schröder⁹ per l'acustica delle sale. Il sistema MLS usato è basato su un computer Toshiba con una scheda di acquisizione A/D ed un generatore MLS su una scheda di espansione. Dettagli su questo sistema di acquisizione MLS si trovano in ¹⁰.

Per la sollecitazione del violino è stato costruito un dispositivo basato su un trasduttore elettromagnetico costruito da Dünwald¹¹. Questo sistema consiste in un filo di rame che si trova in un campo magnetico. Una corrente nel filo quindi esercita una forza (secondo la legge di Lorentz) su esso. Fig. 3 mostra il sistema di misura completa.

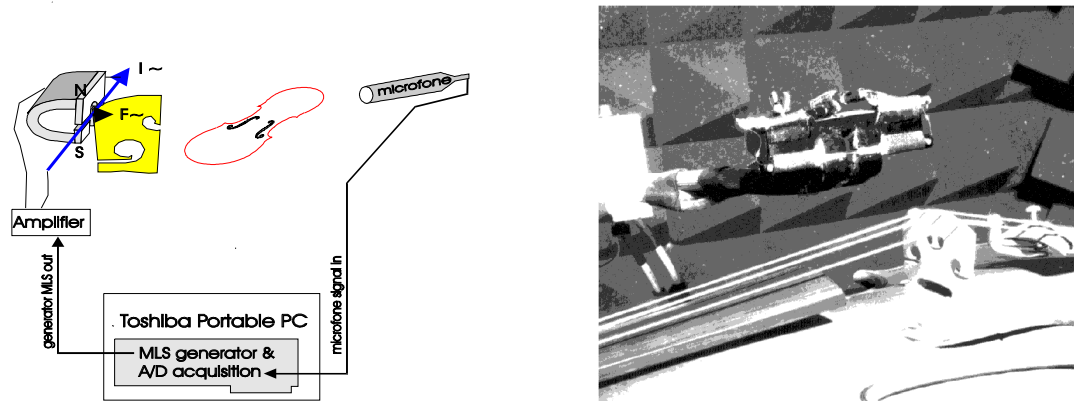


Fig. 3 (a sinistra) set-up di misura con il filo Dünwald (), violino, microfono e sistema di acquisizione e (destra) una foto del trasduttore.

2.2. Esempi di spettri acustici e risposte ad impulso

Lo spettro acustico del violino consiste normalmente di ca. 50 a 100 picchi di risonanza . Fig. 4 (a) mostra un tipico spettro acustico del violino: la gamma in x si estende da 192 a 12kHz, la gamma in y dal massimo a -40db. Questa è diversa dalla gamma usata normalmente dall'autore ed è stata scelta appositamente per dare una visione più generale. Successivamente verrà soltanto considerato la parte dello spettro da 192Hz a 6400Hz, ed in y dal massimo a -20db per ridurre la quantità d'informazione ed per rendere lo spettro più leggibile.

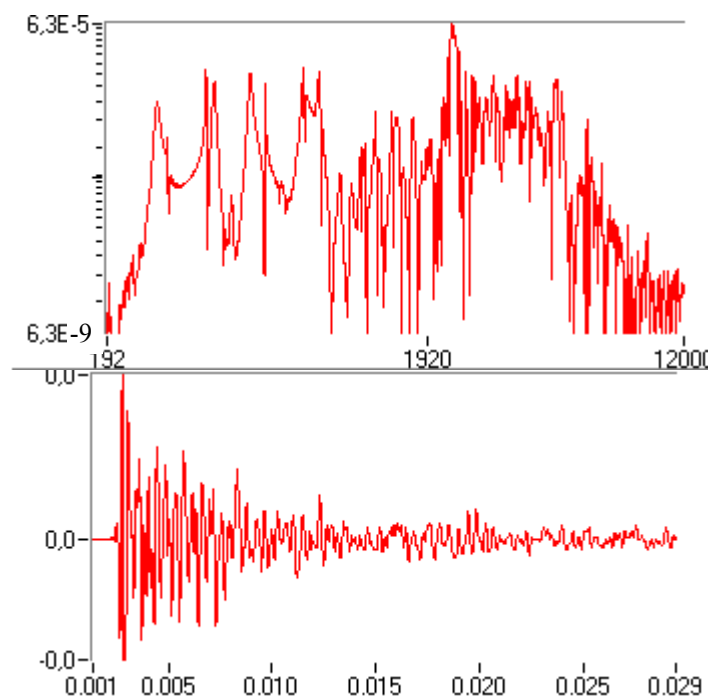


Fig. 4. Spettro acustico (a) e risposta ad impulso (b) per un violino, misurato con il set-up di fig. 3.

È ben visibile dallo spettro di fig.4 (a) che la risonanza più bassa è intorno alla frequenza 280Hz (do-do#). Al di sotto di questa frequenza l'efficienza acustica della cassa è molto bassa. Questa risonanza è la cosiddetta risonanza di Helmholtz, cioè la risonanza del volume d'aria dell'interno della cassa. Poi nella maggioranza degli strumenti seguono due risonanze ben distinte, di ca. 420 ± 40 Hz e ca. 520 ± 40 Hz. Ben visibile sono anche le risonanze delle corde vuote a 296Hz (re), 440Hz (la), 660Hz (mi). Oltre ca. 600Hz si trovano molte risonanze con un leggero massimo intorno i 2-4kHz. Al di sopra di ca. 5kHz lo spettro acustico tende a scendere, oltre i 6 a 8kHz l'ampiezza raggiunge valori trascurabili. Si fa riferimento al capitolo sull'analisi modale per una discussione più dettagliata delle singole risonanze.

Il tempo di decadimento di una risposta ad impulso come rappresentata in fig.4(b) a un valore tipico di 40ms.

Una nota sullo smorzamento delle risonanze: La risonanza Helmholtz tipicamente ha dei valori di smorzamento di ca. 4 a 10%, le altre risonanze della cassa di ca. 1 a 5%, e le corde vuote di tipicamente meno di 0.5%.

2.3. Interpretazione dello spettro acustico usando una rappresentazione tridimensionale

Esaminando molti spettri acustici ci si rende conto che risulta molto difficile trovare una correlazione tra lo spettro acustico del violino e l'impressione sonora del musicista. Un motivo per questa difficoltà è la grande quantità di picchi presenti nello spettro acustico. In più bisogna tenere conto del fatto che non esiste uno spettro 'perfetto'. Strumenti diversi possono avere delle caratteristiche sonore molto diverse, ma essi possono essere degli strumenti 'buoni' nello stesso momento. Ogni tentativo di interpretare lo spettro acustico del violino dovrebbe tenere conto di questo fatto.

È importante sottolineare che, mentre lo strumento viene suonato, il segnale d'ingresso al violino è sempre composto da una frequenza fondamentale e dalle sue armoniche. Fig. 5 è un esempio della velocità del punto d'appoggio della corda "re" sul ponticello. È riportato sia l'andamento nel tempo (che secondo la teoria più semplice dovrebbe seguire una forma triangolare), sia la velocità verso la frequenza. In quest'ultimo grafico è ben visibile la struttura armonica del segnale di sollecitazione (un trattamento molto dettagliato si trova nel libro di L. Cremer³). Questo è tipico per una sollecitazione della corda con un arco.

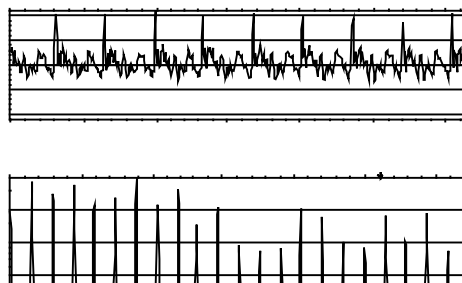


Fig. 5. Una corda sollecitata con un arco da violino. È stata misurata la velocità del punto d'appoggio della corda "re" (293Hz) sul ponticello. In alto l'andamento nel tempo, in basso lo spettro contenente 20 armonici.

Lo spettro acustico nella rappresentazione mostrata in fig. 4 (a) non tiene conto del fatto che alcune frequenze sono sempre sollecitate simultaneamente. Lo spettro acustico, essendo un grafico bidimensionale, semplicemente concatena le ampiezze per frequenze consecutive. Per facilitare la correlazione tra l'impressione sonora (che è dovuta ad una sollecitazione simultanea di una serie die frequenze) la rappresentazione dello spettro dovrebbe essere legata a ciascuna nota suonata sul violino e non ad ogni frequenza suonabile. Un tale tentativo è stato fatto, il concetto è illustrato in fig. 6. Nel retro di fig. 6 è possibile notare lo spettro acustico convenzionale (2D). Che cosa succede quando il musicista suona la nota re - 293Hz ? Come illustrato precedentemente, il suono prodotto contiene sia la frequenza fondamentale di 293Hz sia tutta la serie di armoniche sollecitate simultaneamente. L'ampiezza di ciascuna di queste armoniche dipende da due fattori, dall'ampiezza dello spettro acustico e dalla ampiezza nello spettro della corda sollecitata con l'arco. In fig. 6 (a) sono riportate le ampiezze dello spettro acustico basandosi sulle frequenze delle prime undici armoniche. Questo spettro -fig.6(a)- può essere considerato come lo spettro della pressione sonora del violino quando viene suonato su una corda immaginaria le cui armoniche hanno tutte la stessa ampiezza. Fig. 6 (b) è il grafico per la nota re# (311Hz.)

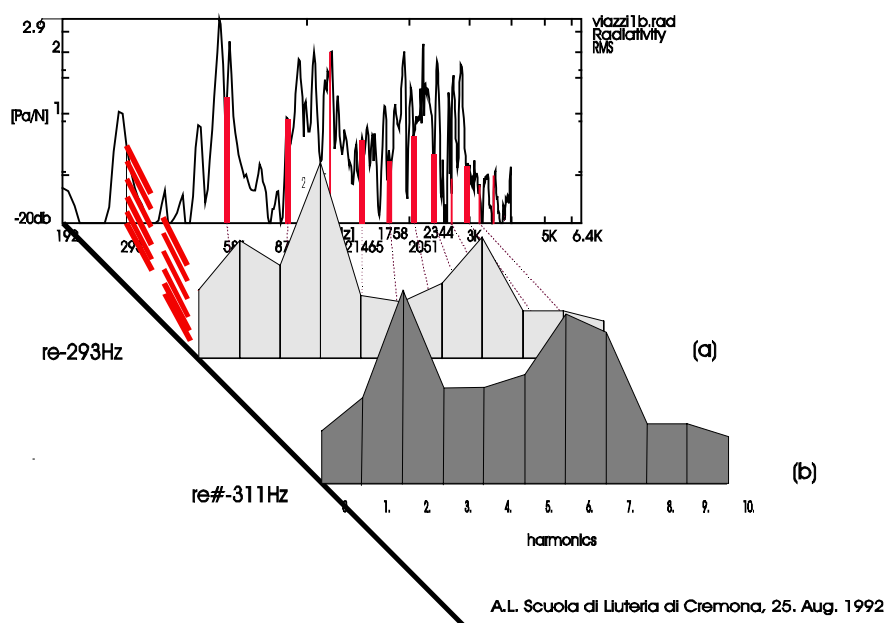


Fig. 6. Il concetto della rappresentazione 3D dello spettro acustico. Raggruppando le armoniche di ogni frequenza fondamentale, lo spettro acustico è più facile da paragonare all'impressione sonora.

Questa procedura viene adesso ripetuta per tutte le note della gamma del violino. Il risultato finale è illustrato in fig. 7 e in fig. 8. Le figure 7 e 8 mostrano sia lo spettro acustico-2D (a) sia la nuova rappresentazione 3D (b). Figura 7 è lo spettro di uno strumento (Antoniazzi) con un suono piuttosto duro, verso il metallico. Questo strumento rende poco sulla corda "sol", dove il suono tende sull'aspro. La figura 8, invece, si riferisce ad uno strumento con un suono piuttosto dolce e chiaro (scuola Amati). Lo strumento ha un timbro molto piacevole, il suo unico difetto è una potenza sonora limitata nelle frequenze basse. Confrontando solo lo spettro acustico 'normale' (2D) è molto difficile dedurre queste proprietà da esso. Dalla tendenza dell'involuppo dello spettro 3D si possono ottenere informazioni sul timbro: Il timbro generale, cioè scuro o chiaro si deduce dalla tendenza dell'involuppo dello spettro 3D. Uno spettro 3D decrescente verso le armoniche alte corrisponde ad uno strumento scuro. Uno spettro di livello costante dappertutto corrisponde ad uno strumento chiaro. Un altro fattore importante è l'omogeneità dello spettro 3D. Più omogeneo è lo spettro 3D più piacevole è il timbro. Uno strumento come quello

rappresentato in figura 7 ha uno spettro con un involuppo molto irregolare; questa irregolarità si manifesta nel suono come un qualcosa di non piacevole. Lo spettro 3D mostrato in figura 8 a un andamento molto piacevole.

Questi due fattori, tendenza ed omogeneità sono le caratteristiche più semplici dello spettro 3D. Un sistema di analisi dello spettro, usando la rappresentazione 3D, è installato permanentemente nel laboratorio delle scuola di liuteria di Cremona e la visualizzazione 3D dello spettro viene apprezzata molto dai liutai e musicisti per la sua leggibilità.

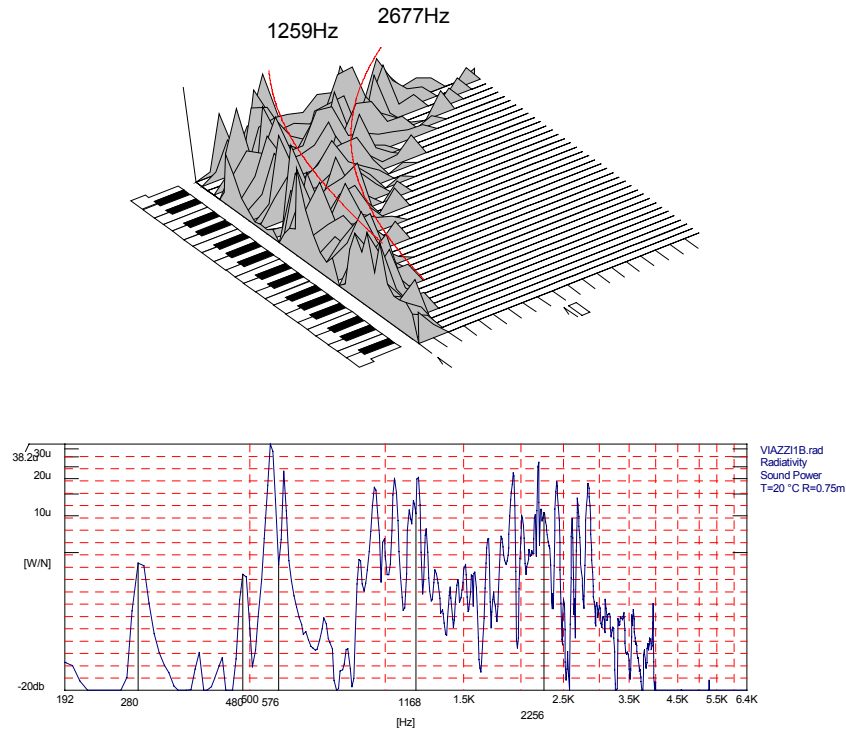


Fig. 7. Spettro 3D (in alto) e spettro acustico per il violino viazzi1b

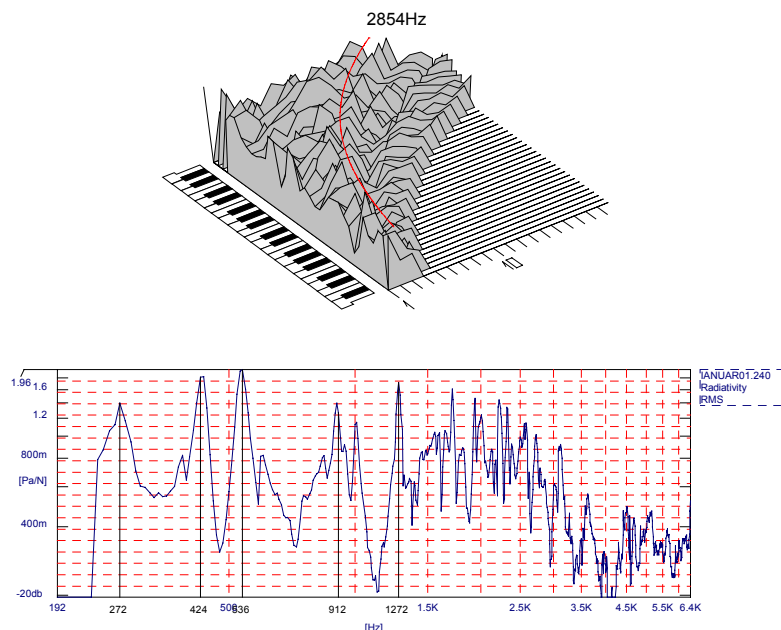


Fig . 8 Spettro 3D (in alto) e spettro acustico per il violino ianuar2

3. La risposta ad impulso e l'applicazione della tecnica di convoluzione

Nella teoria dei sistemi lineari lo spettro acustico e la risposta ad impulso sono equivalenti. Uno è la rappresentazione del sistema nel dominio della frequenza, mentre la risposta ad impulso caratterizza il sistema nel dominio del tempo. Il segnale di uscita del sistema y si calcola tramite la convoluzione del segnale di ingresso x e la risposta ad impulso del sistema h , quindi:

$$x(t) * h(t) = y(t).$$

Per analogia a misure nel campo dell'acustica delle sale $x(t)$ viene chiamato segnale anecoico d'ingresso. La misura della funzione $x(t)$ è difficile ed in questa sede è stato misurato solo il segnale in velocità $v(t)$ e non quello in forza. Il motivo di questa limitazione è che per misurare la forza bisognerebbe inserire una cella di forza tra le corde ed il ponticello del violino. Questo con le tecnologie attuali è molto difficile, dovuto alle dimensioni ridotte. L'unico sensore praticabile è una puntina audio che viene appoggiata sul ponticello del violino. Il segnale della puntina audio è però un segnale in velocità. La risposta ad impulso per la misura si ottiene con il set-up di fig. 3 nelle unità $\left[\frac{p}{F}\right]$, con $p(t)$ pressione sonora e $F(t)$ forza d'ingresso. Infatti, con un segnale d'ingresso in velocità, bisognerebbe eseguire una convoluzione con l'ammettenza $\left[\frac{F}{v}\right]$ per ottenere il segnale di ingresso relativo all'unità della forza. Questa situazione è illustrata in figura 9.

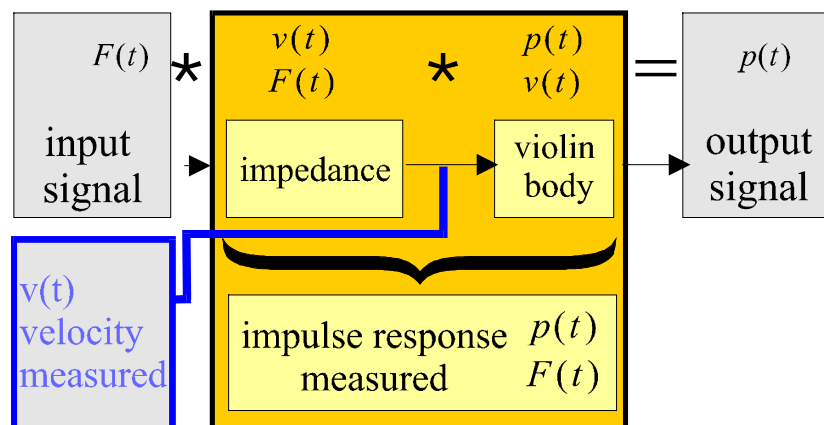


Fig. 9. Linear system model per il violino. Sono stati misurati il segnale $v(t)$, $p(t)$ e la risposta ad impulso.

Avendo a disposizione solo i segnali $v(t)$, $h(t)$ e $p(t)$ bisogna eseguire una deconvoluzione per ottenere il segnale di ingresso. Si potrebbe (a) deconvolvere l'ammettenza dalla velocità $v(t)$ oppure (b) deconvolvere la risposta ad impulso dal segnale di uscita $p(t)$. La soluzione (a) non è molto praticabile, perché la misura dell'ammettenza è molto difficile.

In 3.1. è descritto la procedura (b) per la deconvoluzione della risposta ad impulso dal segnale di uscita, basato sul concetto di Mourjopoulos¹² e descritto da Farina in¹³.

Il segnale $v(t)$ di ingresso è molto interessante, contenente il segnale d'ingresso in forza, il quale è un segnale indipendente dallo strumento. Inoltre in esso contenuta è anche l'informazione dell'ammettenza dello strumento. In¹⁴ due segnali di questo tipo sono stati presentati. Entrambi i segnali $v(t)$ sono stati registrati con una puntina audio sul ponticello. In entrambi casi il musicista suonava lo stesso brano, ma su due violini diversi. Entrambi segnali assomigliano molto ad un violino normale, ma si sente la differenza tra le due registrazioni. Questo significa che l'ammettenza influisce molto in quanto aggiunge il colore del violino al segnale "anecoico".

Nonostante tutte le precedenti limitazioni si potrebbe tentare di convolvere questo segnale d'ingresso con una risposta d'impulso di un violino. Il risultato finale dovrebbe poi

contenere l'informazione dell'ammittenza due volte invece che una volta. Questa convoluzione è stata eseguita ed il risultato è molto incoraggiante: Il suono ¹⁵ è il risultato di una convoluzione con la risposta di un violino moderno. Il suono ¹⁶ invece è il risultato di una convoluzione con la risposta del violino con lo spettro rappresentato in figura 8. Il risultato acustico è ben diverso tra i due suoni ed il carattere generale degli strumenti corrisponde molto bene alla realtà. Il fatto che il confronto tra violini funziona così bene è dovuto a diversi fattori: Per prima bisogna dire che in questo confronto 'virtuale' è possibile eseguire delle ripetizioni del brano senza che il musicista si stanchi. Quindi si tratta di una situazione ideale per il confronto dei violini stessi, perché solo il violino viene cambiato (in realtà viene solo cambiata la risposta ad impulso) e tutte le altre condizioni di riproduzione rimangono identiche, situazione che in realtà non avviene mai. Bisogna porrsi una domanda: come mai il suono riprodotto è così simile ad un suono reale, nonostante il fatto che contiene due volte la ammettenza del violino? Il fatto è che siamo abituati a sentire dei violini in ambienti molto diversi e comunque lo riconosciamo come un violino. Quindi il suono del violino è sempre sovrapposto alla risposta ad impulso del ambiente di ascolto e quindi una seconda sovrapposizione di una ammettenza nella catena viene considerato in modo analogico. Ovviamente questa procedura funziona soltanto se si comparano solo le risposte ad impulso convolute, non bisogna confrontare un violino vero con quello 'virtuale'.

3.1. Inversione della risposta ad impulso

Avendo registrato il segnale $p(t)$ e la risposta ad impulso $h(t)$, il segnale di ingresso $x(t)$ in forza può essere calcolato usando una deconvoluzione:

$$x(t) = y(t) *^{-1} h(t).$$

Ugualmente è possibile convolvere con la risposta ad impulso inversa:

$$x(t) = y(t) * h_{inverse}(t).$$

Quindi si pone la domanda: come invertire delle risposte ad impulso a fase mista ottenendo come risultato un filtro causale stabile e finito? Questo problema è stato investigato da molti autori, i risultati più efficienti sono stati ottenuti da Mourjopoulos^{12,17}. Mourjopoulos propone una approssimazione ai quadrati minimi. È possibile definire un problema dei minimi quadrati con la risposta ad impulso con N sconosciute, che convoluto con la risposta ad impulso originale approssima ad un impulso Dirac. Con la richiesta di minimizzare la somma dei quadrati della differenza si ottiene un set di equazioni lineari, sistema sovradeterminato:

$$\left[R \begin{matrix} (i, j) \end{matrix} \right] \cdot \left\{ h_{inv} \begin{matrix} (i) \end{matrix} \right\} = \left\{ h \begin{matrix} (d-i) \end{matrix} \right\}$$

in cui ogni riga della matrice R rappresenta N campioni della autocorrelazione della risposta ad impulso originale partendo dal tempo 0 per la prima riga e partendo da un campione verso sinistra per la seconda colonna etc. La colonna dei termini noti è una copia della risposta ad impulso originale, ma invertita nel tempo. Questo algoritmo è stato implementato da A.Farina¹⁸ come modulo 'plug-in' usando il Software COOLEDT¹⁹.

3.2 Il confronto 'virtuale' del suono del violino

Una volta ottenuto un segnale anecoico di ingresso buono si può usare questo segnale come base per un confronto acustico di diversi violini di cui si conosce la risposta ad impulso. La qualità del segnale anecoico è determinante per la possibilità di poter sentire le differenze delle diverse risposte ad impulso. Il fisico-acustico è ovviamente molto interessato per nella conoscenza del vero segnale anecoico e quindi preferisce il segnale anecoico calcolato dal segnale $y(t)$ tramite la convoluzione con la risposta ad impulso inversa. Questi segnali anecoici calcolati funzionano bene nel senso che una consecutiva convoluzione con la risposta ad impulso fornisce un segnale quasi identico con l'aggiunta del riverbero. La convoluzione poi di una risposta ad impulso diversa produce un risultato diverso e si può sentire il timbro diverso. In tutti gli effetti dal brano registrato viene tolto l'effetto timbrico del violino e ne viene inserito l'effetto timbrico di un altro violino, quindi è possibile costruire una situazione di creazione virtuale del suono. Vale la pena presentare due segnali: Il segnale²⁰ e ²¹ sono i segnali 'anecoici calcolati dalle risposte ad impulso inverse dei due violini calcani.tim e viandr6b.tim. Idealmente questi due segnali dovrebbero essere identici in quanto rappresentano il segnale di ingresso del musicista. I segnali si assomigliano molto, ma contengono anche del rumore ad alta frequenza. Convolendo questo segnale²⁰ anecoico con la risposta ad impulso originale, si ottiene un segnale che assomiglia ad esso. La convoluzione del segnale²⁰ con due altri violini ed una viola viene presentata soltanto come esempio di ascolto: Nonostante vi sia una componente di rumore digitale è possibile percepire le differenze tra i diversi violini.

4. Analisi Modale sperimentale

L'analisi modale è definita come la descrizione delle proprietà dinamiche di una struttura elastica per i modi normali di vibrazione. L'analisi modale sperimentale la struttura sotto esame viene sollecitata in un punto o alcuni punti, stesso procedimento per la determinazione della risposta in frequenza. Da questo insieme di dati le frequenze proprie con lo smorzamento ed i vettori propri possono essere ricavati. Infatti la popolarità di questo metodo è dovuta anche alla disponibilità di computer e software sofisticati.

Il concetto dell'analisi modale è basato sulla linearità della vibrazione della struttura. Per il violino le ampiezze massime della deformazione delle tavole sono molto piccole e di conseguenza si assume un comportamento lineare ed elastico della struttura. Per la misura stessa delle risposte in frequenza dei diversi punti si può usare una sollecitazione sinusoidale, casuale (random) , pseudo-casuale oppure ad impulso. La risposta della struttura si può misurare meccanicamente, otticamente o per via indiretta misurando il campo sonoro irradiato.

La tecnica dell'analisi modale è già stata applicata al violino, per esempio da Müller²², Marshall²³ e Schleske²⁴. Gli studi finora presentati si limitano a misurare i modi di vibrazione fino a ca. 1kHz e nessuno fa il confronto con lo spettro acustico per conoscere l'efficienza acustica di un modo. Un'altra limitazione finora scontrata è il fatto che la direzione di sollecitazione nella misura non corrisponde alla direzione di sollecitazione con un arco. Il sistema usato qui fa uso di una relazione di reciprocità: Solleccitatore, ricettore del segnale e i canali dell'analizzatore sono scambiati. Così si può usare una puntina audio sul ponticello del violino come ricettore e per la sollecitazione ad impulso si usa un martello ad impatto. La puntina audio, oltre ad influire pochissimo sul movimento, misura il segnale nella stessa direzione della sollecitazione con l'arco, quindi nel risultato si vedranno solo i modi che effettivamente vengono sollecitati normalmente. Il set-up è descritto in²⁵. In seguito verrà presentato un tentativo di catalogare i diversi modi di vibrazione del violino.

4.2. I principali modi del violino

Per il postprocessing dei modi è stato usato il programma STARModal. Il ‘fitting’ dei modi si è svolto in due passi: nel primo passo sono state determinate le frequenze proprie e lo smorzamento, in un secondo passo gli ‘Eigenvektoren’ del modo. Questo metodo fornisce risultati migliori con una densità dei modi elevata come è il caso del violino.

È ovvio che una struttura complessa come il violino ha molti modi di risonanza, ed è anche ovvio che la struttura dettagliata dei modi varia da un violino all’altro. Per ora sono stati misurati ca. 30 violini, e si è verificata una notevole variazione del comportamento. Spesso però certi ‘Eigenvektoren’, cioè modi di vibrazioni, sono riconoscibili in quasi tutti violini, anche se le frequenze proprie variano. Succede però anche che certi modi di vibrazioni sono particolari per un certo violino, come per esempio per il violino descritto nella pubblicazione di Schleske²⁴.

Molti modi del violino sono però comune a tutti i violini, determinati probabilmente dalla forma geometrica che è ben definito per un violino. Vale quindi la pena di discutere tutti modi possibili; per questo motivo è stato scelto un violino ‘standard’ come esempio. Verrà in seguito discusso il risultato dell’analisi modale del violino viand6g. Lo spettro mostra dimostra ca. 100 modi di risonanza nella gamma 160Hz a 3,2kHz, di cui 36 modi sono stati identificati. A frequenze minori di 1kHz praticamente tutti modi con efficienza acustica elevata sono stati identificati. Verso le frequenze più alte (> 1.5kHz) la densità dei modi è talmente elevata che non era possibile identificare tutti modi; soltanto certi modi (a parte scelte a caso) sono stati esaminati. La figura 10 mostra graficamente alcune dei 36 modi misurati.

- I modi più bassi (ca. 160-240Hz):

Una prima serie di modi del violino è rappresentata da flessioni del manico rispetto alla cassa e da torsioni e flessioni della tastiera. Anche la cordiera subisce delle oscillazioni forti. In tutti questi modi il manico partecipa in modo determinante alle vibrazioni. Alla frequenza di 163Hz (modo 1) tutto il manico flette rispetto al violino. Sovrapposto a questo movimento si verifica una torsione della tastiera verso l’asse longitudinale ed una forte rotazione della cordiera. La risonanza della frequenza 189Hz (modo 2) assomiglia molto a modo 1, solo che non si nota la flessione manico/cassa. Il modo 3 (214Hz) è dominato dalla prima flessione per il lungo della tastiera. Il modo 4 (233Hz) è prevalentemente una rotazione della cordiera dello strumento, anche se sovrapposto da una flessione per il lungo della tastiera. Tutti questi modi dimostrano forti vibrazioni del manico con ampiezze alte e sono quindi percepibile dal musicista. Nessuno di questi modi ha una resa acustica significativa.

- la risonanza di Helmholtz (ca. 270-280Hz)

Questa risonanza è dovuta al volume d’aria all’interno della cassa del violino ed alle aperture delle “effe”. È una risonanza con un’ottima efficienza acustica ed è la più bassa delle risonanze principali del violino. Sia la tavola che il fondo (a volte meno forte) si muovono interamente in modo simile ad una membrana fissata sui bordi. Il fondo e tavola si muovono sempre contro fase.

- Rotazione tra le “C” (360Hz , tipico ca. 330-390Hz)

Le parti attive di questa risonanza sono le parti centrali della cassa (sulla tavola si direbbe tra le "C") del violino. Essi subiscono una rotazione intorno all'asse longitudinale del violino, sia sul fondo che sulla tavola. L'efficienza acustica di questa risonanza è variabile. Mentre la teoria dice che per una tale forma modale si ha un "circuito corto" per l'irradiazione del suono (la lunghezza di onda a 400Hz è molto maggiore della larghezza della cassa del violino), le misure variano secondo il violino. Sembra che l'efficienza acustica dipenda anche dagli altri modi vicini e una combinazione lineare degli tutti 'Eigenvektoren' potrebbe avere un'efficienza acustica alta.

- Copia delle risonanza delle tavole del violino (447Hz & 556Hz, tipico 450±50Hz & 550±50Hz)

Queste due risonanze rappresentano quelle principali risonanze della cassa del violino ed il loro comportamento è determinante per lo spettro acustico a basse frequenze. Nella maggior parte dei casi la tavola è più attiva del fondo. Alla risonanza più bassa (447Hz), nella maggior parte dei casi, si verifica una flessione della tavola lungo l'asse longitudinale. Le parti delle "C" al di fuori delle "effe" si muovono in controfase. In alcuni strumenti il fondo intero subisce una flessione longitudinale: il fondo è in questo caso in fase con la tavola. È possibile in molti casi che la parte libera della tastiera dimostri una rotazione oppure una flessione.

La risonanza più alta delle due (556Hz) dimostra un comportamento diverso: il fondo flette adesso secondo l'asse trasversale dello strumento. Anche la tavola flette in senso trasversale, tutta la parte della tavola intorno alla catena è in fase e subisce un movimento molto forte. Questa risonanza è condizionata dall'esistenza della catena, degli eventuali interventi influiscono fortemente su questo modo di vibrazione. Non tutta la tavola si muove in fase, la metà destra della parte inferiore della tavola si muove in contro fase rispetto al resto della tavola. La parte della catena della tavola e la parte centrale del fondo si muovono in fase dando un'ottima efficienza acustica.

- I modi di prima - seconda ordine (691Hz, 778Hz , 793Hz , 914Hz, 958Hz, 1kHz)

Aumentando la frequenza i modi non agiscono più sulle parti intere della superficie, ma le zone aventi fase uguale si spezzano e si formano delle linee nodali. Nei casi semplici le linee nodali si trovano lungo l'asse trasversale della tavola (modo 9- 691Hz) o del fondo (modo 11 - 793Hz). Altri modi con linee modali miste, ma sempre di prima oppure seconda ordine, sono il modo 10 - 778Hz (tavola nella parte inferiore destra molto attiva, fondo contro fase), il modo 12-914Hz, il modo 13 - 958Hz (rotazione della parte centrale delle 'C' con parte superiore della tavola) ed i modi 14- 1,0kHz e 15 - 1,13kHz.

- Le risonanze delle palette delle "effe" (1,14kHz, 1,49kHz, 1,56kHz, 1,6kHz, 1,63kHz, 1,68kHz, 1,78kHz, 1,85kHz, 1,88kHz)

Nella gamma 1,14 - 1,8kHz (tipico) ci sono alcune risonanze in cui l'unica parte attiva del violino è rappresentata dalle palette delle "effe" del violino. Nel violino sotto esame 6 delle 9 risonanze nella gamma tra 1,14kHz e 1,88kHz sono delle oscillazioni delle. Il movimento delle palette delle "effe" è quindi la sorgente principale di emissione acustica in questa gamma di frequenza.

- I modi di ordine superiore e forma non determinata: (oltre 1,2kHz tipicamente)

A frequenze più alte i modi diventano sempre più complessi e sono difficilmente

catalogabile. Le aree di fase contigue sono molto piccole con un numero di linee nodali elevate. Esistono modi con nodi modali longitudinali , trasversali, lungo il bordo e misti. Vedi i modi 17,18, 25,28-36. Le ampiezze di questi modi possono raggiungere quelle dei modi principali della cassa (modo 28 - 1,96kHz) e ,visto che il massimo dello spettro acustico sta normalmente nella zone 1,5-3kHz, questi hanno una buona resa acustica. È da notare che anche le parti della tastiera subiscono delle flessioni e torsioni non indifferenti (modi 32, 33,36).

5. Conclusioni e prospettive

Per conoscere meglio il comportamento del violino sono stati esaminati diversi aspetti: L'analisi modale ci fornisce l'informazione molto dettagliata sui modi di vibrazione. I risultati dimostrano un comportamento molto complicato e si nota un numero di modi elevato. In un primo tentativo questi modi sono stati catalogati. Il confronto di questi modi di vibrazione della cassa con lo spettro acustico dimostra che non tutti i modi hanno una efficienza acustica elevata. Inoltre non è sempre possibile dedurre intuitivamente la resa acustica di un modo dallo studio dei modi.

Alcuni modi della cassa sembrano guidati da singoli componenti: Un modo è condizionato dalla catena, un altro è condizionato dalla rigidità trasversale della tavola sopra le "effe", ancora altri modi coinvolgono solo le palette delle "effe". Questo è un risultato molto importante perché permette ad un liutaio di modificare in modo mirato il comportamento di un certo modo o di una gamma di frequenza.

La misura dello spettro acustico è molto importante perché è legato strettamente alle qualità acustiche del violino. La novità del set-up consiste nell'utilizzo di un sensore specifico per le esigenze del violino. Per l'interpretazione dello spettro acustico, la rappresentazione 3D permette una lettura più intuitiva e diretta delle caratteristiche acustiche. Delle caratteristiche "chiave" come chiaro/scuro e aspro/rotondo si possono facilmente leggere nello spettro 3D.

Il concetto del violino "virtuale" permette di riascoltare il suono avendo soltanto il suo spettro acustico o la risposta ad impulso. Per il confronto tra violini "virtuali" il metodo della convoluzione di un segnale anecoico con le risposte ad impulso fornisce ottimi risultati e la differenza timbrica dei brani "virtuali" corrisponde alla differenza reale degli strumenti.

In che direzione andrà la ricerca nell'acustica del violino? Sembra che tutto punti nella direzione di poter modellare il suono: Lo spettro acustico, il violino "virtuale" e la rappresentazione 3D possono indicarci le frequenze da modificare nello spettro per migliorare il suono. L'analisi modale, infine, permette di individuare le aree da modificare con pialletta e rasiera dal liutaio. Dobbiamo allora aspettarci che nel futuro tutti i violini avranno lo stesso timbro? Sono sicuro che non sarà così per un semplice motivo: La bellezza del suono è una caratteristica puramente soggettiva e quindi ogni liutaio, ogni musicista ed ogni ascoltatore ha un'idea diversa di come deve essere questa bellezza di suono. Grazie a questi studi approfonditi, un liutaio, in futuro, potrà realizzare in modo migliore il suo ideale sonoro, avendo una conoscenza maggiore su come modellare un certo suono, senza subordinare comunque la propria espressività.



163Hz

189Hz

233Hz

torsioni e flessioni della tastiera



Helmholtz 282Hz

Torsione delle parti centrali 360Hz

Principale 1 447Hz

le risonanze principali con efficienza acustica molto alta fino a ca. 600Hz



Principale 2 556Hz

2.ordine longitudinale 793Hz

2.ordine trasversale solo tra le C e parte superiore 958Hz

le risonanze di 2.ordine e in più



2.ordine trasversale solo tra la parte inferiore 1,13kHz

Paletta delle effe 1,49kHz

Paletta delle effe 1,88kHz

risonanze delle palette delle effe (1,4kHz a 1,88kHz)



Modo di alta ordine 1,24kHz

Modo di alta ordine 2,20kHz

Modo di alta ordine 2,47kHz

Figura 10. Le risonanze di alta ordine con forma molto complessa

Riferimenti:

- ¹ Farina A. "An example of adding spatial impression to recorded music; signal convolution with binaural impulse responses", Proceedings of Acoustics and Recovery of Spaces for Music, Ferrara 27-28 Ottobre 1993
- ² Askenfelt A. A look at violin bows ,Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference July 28 - August 1,1993
- ³ Cremer L., "The Physics of the Violin" ,tradotto da J.A.Allen, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, "Physik der Geige", S. Hirzel Verlag , Stuttgart, 1981
- ⁴ McIntyre M E and Woodhouse J (1979) . "On the fundamentals of bowed -string dynamics", Acustica 43 93-108
- ⁵ Rogers O. E., Masino T. R. , "The effect of wood removal on bridge frequencies", CAS Vol. 1, No. 6, pp 6-11,1990
- ⁶ Rogers O. E., "Influence of local thickness changes on violin top plate frequencies", CAS Vol. 1, No. 7, pp 6-11,1991
- ⁷ Meinel H .(1937). "Über Frequenzkurven von Geigen". Akust. Z. **2**, 22-33. Reprinted in Hutchins, C. M. (1976) "Musical Acoustics,Part II. Violin Family Functions." Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania.
- ⁸ Langhoff A., "Measurement of acoustic violin spectra and their interpretation using a 3D representation" Acustica Vol. 80, pp. 505-515 (1994).
- ⁹ Schröder M.R., "New method of measuring reverberation time" Journ. Ac.Soc.Am., Vol. 37, pp 409ff, 1965.
- ¹⁰ Farina A. "An example of adding spatial impression to recorded music: signal convolution with binaural impulse responses" - Proc. of "Acoustics and Recovery of Spaces for Music", Ferrara (Italy) 27-28 Oct. 1993.
- ¹¹ Dünwald H. - "Ein Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen" - Acustica vol. 58, pp.162 (1985).
- ¹² Mourjopoulos J.N. "Digital Equalization of room acoustics", J.A.E.S. vol. 42, No. 11, pp.884-900, Novembre 1994.
- ¹³ Farina A., Langhoff A., Tronchin L., "Realisation of 'virtual' musical instruments: measurements of the impulse response of Violins using the MLS technique". Proc. 2nd. International Conference on Acoustics and Musical Research CIARM 95, 19-21 May 1995
- ¹⁴ Langhoff A., Farina A., Tronchin L., "Comparison of Violin Impulse Responses by Listening to Convolved Signals", Proc. International Symposium of Musical Acoustics ISMA 95, Dourdan France, esempi di suono 1 e 2.
 - 1: velocity signal measured on the bridge top with a phonograph needle, W.A. Mozart D-major concert cadenza, played on a Calcanius violin (WAV file: velocity\calcani.wav).
 - 2 : velocity signal measured on the bridge top with a phonograph needle, W.A. Mozart D-major concert cadenza, played on a modern violin (WAV file: velocity\viandr6.wav).
- ¹⁵ del riferimento 14 : suono 8
 - 8: Convolved sound output. As input signal the velocity signal 2 was used. The violin impulse response belongs to the modern violin (impulse response: viandr6.tim) (WAVfile: convolve\velocity\calcani\viandr6.wav).
- ¹⁶ del riferimento 14 : suono 9
 - 9: Convolved sound output. As input signal the velocity signal 2 was used. The violin impulse response belongs to a N. Amati workshop violin (spectrum file: ianuar2.h_3)(WAVfile: convolve\velocity\calcani\ianuar2.wav).
- ¹⁷ Clarkson P. M., Mourjopoulos J., Hammond J.K., "Spectral Phase and transient equalization for audio systems", J.A.E.S. vol.33 pp 127-132, march 1985
- ¹⁸ A. Farina, COOLETIT inverse filter extension INVERT.XFM e-mail: farina@pcfarina.eng.unipr.it
- ¹⁹ D.Johnston, COOLETIT Software package e-mail: Syntrill@aol.com
- ²⁰ Esempio Acustico: Segnale anecoico calcolato dalla convoluzione del segnale microfono (right.wav) con la risposta ad impulso inversa ~vi6prec.tim (WAV file: sounds\inverted\leatsquare\viandr6b\anecoic.wav).
- ²¹ Esempio Acustico: Segnale anecoico calcolato dalla convoluzione del segnale microfono (right.wav) con la risposta ad impulso inversa ~calcani.tim (WAV file: sounds\inverted\leatsquare\calcani\anecoic.wav).

- ²² H. Müller, H. Geissler , “Modal Analysis of a Violin”, Stockholm Musical Acoustics Conference (SMAC83) Proceedings, 1983
- ²³ Marshall, K.D. “Modal analysis of a violin”. *J. Acoust. Soc. am.* 77, 695-709.
- ²⁴ Schleske, M. “The influence of changes in the distribution of mass and stiffness of violin-plates on eigenfrequencies and mode-shapes of the violin”, Stockholm Musical Acoustics Conference (SMAC93) Proceedings, 1993
- ²⁵ Langhoff A., “Modal Analysis of violin, viola and cello compared to the acoustical spectrum”, Proc. International Symposium of Musical Acoustics ISMA 95, Dourdan France.