

UN ESPERIMENTO SULLA PERCEZIONE DI VIBRAZIONI SULLA TASTIERA DEL PIANOFORTE NELLA PERFORMANCE MUSICALE

Federico Fontana (1), Hanna Järveläinen (2), Stefano Papetti (2),
Federico Avanzini (3), Francesco Zanini (4), Valerio Zanini (4)

- 1) Università di Udine, Dip. di Matematica e Informatica, federico.fontana@uniud.it
- 2) Zürcher Hochschule der Künste, Inst. for Comp. Music and Sound Tech.,
- 3) Università di Padova, Dip. di Ingegneria dell'Informazione
- 4) Conservatorio di Musica "Cesare Pollini", Padova

1. Introduzione

La ricerca scientifica sta progressivamente riconoscendo l'importanza della percezione multi-sensoriale nella performance musicale [1] e in particolare il ruolo del feedback aptico (propriocettivo e vibrotattile) nel determinare la qualità percepita di uno strumento musicale. Lavori recenti hanno studiato quantitativamente le vibrazioni trasmesse allo strumentista dal pianoforte o dal violino [2,3], e i correlati emozionali della percezione di sensazioni vibrotattili nella performance musicale [4,5].

Nel caso del pianoforte, la modalità aptica contribuisce alla qualità dello strumento prima di tutto dal punto di vista del *tocco*, determinato da materiale e risposta dinamica dei tasti nell'accoppiamento meccanico con le corde [6]. Galembo e Askenfelt hanno mostrato che un pianista esperto sa tipicamente distinguere pianoforti diversi suonandoli da bendato, mentre questa abilità si perde se il task di riconoscimento è basato solo sull'ascolto passivo del suono e non sul tocco [7]. Vari autori hanno presentato prototipi di tastiere elettroniche con feedback aptico [8,9,10], mostrando che la vibrazione alle dita veicola informazione rilevante al pianista. Yamaha Corp. ha recentemente inserito dei trasduttori di vibrazione nella tastiera del proprio pianoforte digitale AvantGrand, allo scopo di simulare il feedback vibrotattile prodotto da un pianoforte acustico [11].

La letteratura esistente non ha tuttavia esplorato in profondità la relazione tra la qualità percepita di un pianoforte e le sue caratteristiche aptiche. C'è generale accordo sul fatto che tastiere composte da tasti di materiale plastico e con meccaniche semplificate, come quelle presenti su pianoforti digitali di fascia media, offrono al pianista un'esperienza inevitabilmente meno gratificante. Tuttavia, ad oggi non sono ancora stati studiati gli effetti soggettivi che tastiere di questo tipo producono sulla qualità sonora percepita. Ancor meno si sa sugli effetti prodotti dal feedback vibrotattile che dalle vibrazioni dello strumento si trasmette alle dita del pianista dopo la pressione del tasto. In un recente studio [12], alcuni degli autori di questo lavoro hanno presentato un esperimento su un pianoforte digitale a cui è stato aggiunto feedback vibrotattile.

L'esperimento ha studiato la qualità sonora percepita in varie configurazioni: i) suono del pianoforte digitale originale; ii) suono prodotto da un sintetizzatore a modelli fisici; iii) suono e feedback vibrotattile prodotti entrambi dal medesimo sintetizzatore. I soggetti sperimentali hanno mostrato di preferire la configurazione (iii) nel caso di ripetizione di sequenze prefissate di tasti, mentre hanno privilegiato la configurazione (ii) nel caso di performance libera. Per quanto preliminari, questi risultati suggeriscono che il feedback vibrotattile modifica e potenzialmente migliora l'esperienza del pianista.

Risultati diversi sono quelli a cui sono giunti Askenfelt e Jansson [2] studiando la percezione delle vibrazioni di un pianoforte a coda. Gli autori hanno mostrato quantitativamente che anche nella dinamica *ff* le parziali dei segnali di vibrazione al tasto hanno generalmente ampiezza inferiore alla soglie percettive vibrotattili misurate alle dita [13,14]. Questi risultati sembrerebbero perciò supportare la tesi che un pianista non percepisce stimoli vibrotattili provenienti dallo strumento, siano queste veicolate attraverso la tastiera, la pedaliera, o altre parti.

Tuttavia, le soglie percettive appena menzionate si applicano a segnali vibratorii di tipo sinusoidale, mentre valori di soglia più bassi sono da attendersi nel caso di segnali spettralmente ricchi. Vanno inoltre considerate altre componenti che concorrono alla percezione del pianista, il quale durante la performance è impegnato in una esperienza enattiva in cui ogni pressione del tasto produce un distintivo evento audio-aptico di contatto seguito dalla vibrazione delle corde e della tavola armonica. Tutte queste componenti sono soggette a disparati effetti di interferenze, costruttive e distruttive, temporali, spaziali, spettrali, in dipendenza dalle sequenze di note e accordi suonati e dalla posizione delle mani sulla tastiera. Tali effetti sono stati studiati sporadicamente nella letteratura scientifica, e in condizioni semplificate rispetto a una realistica performance musicale [15]. Nell'ipotesi che le vibrazioni del pianoforte siano percepibili dallo strumentista, Keane e Dodd [6] hanno chiesto a pianisti professionisti di classificare diversi pianoforti verticali rispetto all'intensità percepita delle loro vibrazioni. Il modello con meno vibrazioni (ovvero quello con il telaio della tastiera più rigido) è risultato essere il preferito. Tuttavia gli autori notano che in generale gli strumentisti non prestavano coscientemente attenzione al tocco e alle vibrazioni.

Anche in questo articolo si ipotizza che i pianisti ricevano informazione vibrotattile attraverso le dita durante la performance musicale. L'esperimento qui presentato è stato svolto con due gruppi di strumentisti su un pianoforte verticale e uno a coda, attrezzati in modo tale da consentire di “accendere” o “spegnere” a piacimento le vibrazioni senza modificare la risposta sonora. I risultati sperimentali mostrano differenze statisticamente significative tra la condizione senza vibrazioni e quella con vibrazioni.

2. Setup

L'esperimento ha fatto uso di due setup simili ma distinti, basati su due pianoforti Disklavier di Yamaha: un modello DC3 M4 a tre quarti di coda (setup allestito nei laboratori di Padova, o “PD” per brevità) e un modello DU1A verticale con unità di controllo DKC-850 (setup allestito nei laboratori di Zurigo, o “ZH” per brevità). Entrambi i modelli sono dotati di una modalità “silenziosa” che permette di usarli come tastiere master MIDI. In questa modalità la percussione dei martelletti sulle corde viene inibita meccanicamente, e quindi il pianoforte non risuona e non vibra, lasciando comunque inalterata la meccanica della tastiera.

La possibilità di alternare sui Disklavier la modalità silenziosa alla normale modalità acustica è stata qui sfruttata per creare due configurazioni: una in cui lo strumento

produce vibrazioni sulla tastiera, e un'altra in cui tali vibrazioni non sono presenti. Al fine di rendere queste due configurazioni indistinguibili dal punto di vista sonoro, è stato predisposto un setup che impedisce ai pianisti di sentire il suono acustico prodotto dal Disklavier. Più precisamente, i dati MIDI prodotti dal Disklavier vengono usati per controllare un sintetizzatore a modelli fisici¹ di alta qualità, a sua volta configurato per simulare rispettivamente un pianoforte a coda (PD) o verticale (ZH). I dati MIDI provenienti dai due pianoforti vengono raccolti da una scheda audio RME Fireface 800 e inoltrati a un computer laptop su cui viene eseguito il sintetizzatore.

Durante la performance i pianisti sentono quindi solamente il suono del sintetizzatore, attraverso cuffie altamente isolanti Sennheiser HDA-200 (PD) o attraverso auricolari Shure SE425 ricoperti da cuffie antirumore 3M Peltor X5A (ZH). Al fine di massimizzare il realismo del suono sintetico, si è equalizzata la pressione sonora prodotta dal sintetizzatore in cuffia con quella prodotta dal corrispettivo pianoforte acustico all'orecchio del pianista. Test informali hanno mostrato che con questo setup il suono acustico del pianoforte viene completamente mascherato da quello del sintetizzatore, e durante la performance il pianista non percepisce alcuna differenza sonora tra la configurazione acustica e quella silenziosa del Disklavier.

I pedali dei pianoforti sono stati resi inaccessibili e non sono stati usati nell'esperimento. I piedi dei due pianoforti sono stati appoggiati su vari livelli di gomma fonoisolante, mentre gli sgabelli e i piedi dei pianisti sono stati isolati dal pavimento usando uno spesso pannello di gomma, minimizzando così la trasmissione di vibrazioni da tutti i canali tranne che dal contatto dita-tastiera. I due setup sono mostrati in Fig. 1.



Figura 1: setup dei due pianoforti Disklavier. Sinistra: Yamaha DC3 M4 (PD). Destra: Yamaha DU1A (ZH).

Il software di controllo sviluppato (usando l'ambiente Pure Data) legge per ogni soggetto sperimentale un file contenente una sequenza di trial (una riga del file descrive un singolo trial attraverso informazione del tipo: “nota A4, modalità silenziosa”), registra la risposta data dal soggetto per ogni trial, ed effettua un test di correttezza sulla nota effettivamente suonata dal soggetto e sul valore di MIDI velocity utilizzato (si veda la prossima sezione per dettagli). La transizione tra modalità acustica e silenziosa del Disklavier è stata completamente automatizzata e viene anch'essa gestita dal software di controllo.

1 Modartt Pianoteq 4.5. Si veda www.pianoteq.com.

3. Procedura sperimentale

Il test è un esperimento di tipo Sì/No. Il soggetto sperimentale ha il compito di eseguire una sequenza di trial, ciascuno dei quali consiste in una nota lunga (quattro battiti di metronomo a 60BPM) a dinamica elevata (indicativamente da *mf* a *fff*). Dopo l'esecuzione di ogni trial, il soggetto deve indicare se ha percepito o meno vibrazioni sul polpastrello del dito con cui ha suonato la nota, dicendo ad alta voce “Sì” oppure “No”.

Si sono considerate solamente le note A (La) di tutte le ottave, così da ridurre la durata dell'esperimento massimizzando al contempo l'estensione sulla tastiera. Gli 8 tasti A sono stati contrassegnati sulla tastiera tramite numeri (1=A0 ... 8=A7) al fine di minimizzare il rischio di errori di esecuzione da parte dei soggetti. I tasti 1-4 (A0-A3) vengono suonati con l'indice della mano sinistra, mentre i tasti 5-8 (A4-A8) vengono suonati con l'indice della mano destra. Per ogni soggetto sperimentale viene creata una sequenza randomizzata di 128 trial, composta da 16 ripetizioni di ciascuno degli 8 tasti A. Metà di questi viene associata alla configurazione silenziosa del Disklavier.

Ogni soggetto viene inizialmente istruito su finalità e modalità dell'esperimento. Viene richiesto esplicitamente di prestare attenzione alle vibrazioni prodotte su ogni tasto suonato, e di non considerare l'informazione tattile iniziale fino alla fine corsa del tasto stesso. Prima dell'inizio dell'esperimento il soggetto indossa le cuffie isolanti (PD), o la combinazione auricolari e cuffie antirumore (ZH). Come già discusso, in questo modo il soggetto può sentire solo il suono prodotto dal sintetizzatore, mentre il suono acustico del Disklavier (se presente, ovvero nella normale modalità acustica) viene completamente mascherato. Per ogni trial, il soggetto sente una voce registrata che lo istruisce su quale tasto A suonare (numeri 1-8), e subito dopo un suono di metronomo.

Se il software di controllo verifica che il valore di MIDI velocity prodotto dall'azione del soggetto è al di sotto dell'intervallo 73-127,² si chiede di ripetere il trial. Il software controlla inoltre che la nota suonata sia quella prescritta dal trial corrente. Al termine di ogni trial e dopo avere fornito la propria risposta, il soggetto deve allontanare le mani dalla tastiera così da non percepire il movimento meccanico prodotto dalla eventuale transizione tra modalità acustica e modalità silenziosa.

La durata totale dell'esperimento è risultata essere di circa 20 minuti per soggetto. Vi hanno partecipato due distinti gruppi, usando il setup con il pianoforte a coda (PD) o verticale (ZH). I soggetti dell'esperimento PD erano maschi, con età media di 32 anni. Quelli dell'esperimento ZH avevano età media di 37 anni e tre erano femmine. La maggior parte aveva capacità pianistiche di livello almeno medio. Un soggetto era un pianista professionista, mentre tre soggetti avevano capacità pianistiche elementari.

4. Risultati

Si è calcolata la proporzione di risposte corrette per ogni soggetto e tasto:

$$p(c) = \frac{\text{hits} + \text{correct rejections}}{\text{total trials}}$$

In Fig. 2 sono mostrati i risultati medi per entrambi i pianoforti. Si può notare che la tendenza è simile: sulle tre note più gravi (A0-A2) i soggetti sono stati in grado di discriminare facilmente i trial in cui la vibrazione era presente da quelli in cui non lo era. Nel registro intermedio la i valori sono ancora sopra il 60%, mentre scendono sotto la soglia del 50% a partire dalla nota A5 ($f_0=880$ Hz).

² Questo intervallo di valori corrisponde approssimativamente alle dinamiche da *mf* a *fff*.

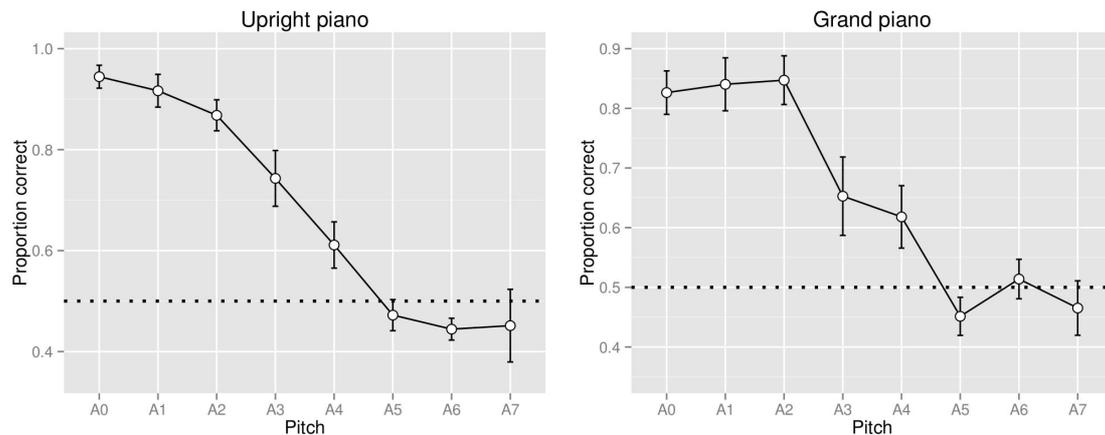


Figura 2: Proporzioni di risposte corrette medie per il pianoforte verticale (sinistra) e a coda (destra). La linea tratteggiata rappresenta la soglia. Gli intervalli di confidenza tra soggetti sono stimati come in [16].

Nel caso dei dati del pianoforte acustico, si è fatto uso del d' test [17] per stimare la capacità di discriminazione. A causa del crescente bias statistico di d' al decrescere del numero di trial con segnale e con rumore (8 ciascuno), e al fine di evitare proporzioni esatte che porterebbero a valori infiniti per d' , si sono raggruppate proporzioni individuali all'interno di sottoinsiemi di soggetti per i quali il criterio c e la capacità di discriminazione d' sono ragionevolmente simili [18]. Per ogni tasto si è stimato un valore d' di gruppo calcolando la media tra 2-3 di questi sottoinsiemi, al fine di ottenere una misura meno rumorosa di quella prodotta mediando su tutti i valori individuali di d' .

A seconda del loro comportamento, i soggetti possono essere approssimativamente divisi in due gruppi principali. Un primo gruppo tende a dire “no” nel registro basso, dove la discriminazione è più facile, e a dire “sì” nel registro alto dove questa è praticamente impossibile. Questo gruppo sembra seguire una strategia di bilanciamento, rispetto ai registri, della proporzione di risposte positive/negative. I soggetti del secondo gruppo, al contrario, seguono la strategia opposta e tendono a dire “sì” nel registro basso e “no” in quello alto, come se avessero concluso che non esistono casi “sì” nel registro alto e, per compensare, abbassassero il criterio nel registro basso.

In Fig. 3 sono mostrati i valori di d' stimati in funzione dell'altezza della nota. Anche in questo caso i valori scendono sotto la soglia a partire dalla nota A5, arrivando a circa 0.5 in corrispondenza di A4. Nell'intervallo A0-A3, i valori scendono da discriminabilità alta a moderata ($d'=1$ corrisponde al 69% di risposte corrette). Nel caso del pianoforte a coda i comportamenti dei soggetti sono più variegati e non è stato possibile creare raggruppamenti per stimare un valore d' di gruppo. In questo caso l'analisi dei risultati si basa quindi solo sulle proporzioni di risposte corrette.

L'altezza a cui le vibrazioni diventano impercettibili sembra essere localizzata intorno alla nota A4 ($f_0=440$ Hz). Si è quindi analizzata la distribuzione delle risposte individuali per questa nota. Poiché il test di Kolmogorov-Smirnov supporta l'ipotesi che entrambe le distribuzioni condividano la stessa posizione ($D=0.111$, $p=1$), queste sono state combinate. Si è analizzata la normalità della distribuzione risultante ($\mu=0.615$, $\sigma^2=0.032$) tramite il test di Shapiro ($W=0.926$, $p=0.164$), verificando che questa è approssimativamente normale. Tramite t-test si è poi trovato che l'intervallo di confidenza al 95% è $[0.525, 0.704]$. Poiché la soglia di risposta casuale ($p(c)=0.50$) è appena fuori da questo intervallo, si può concludere che le vibrazioni sono ancora

percepibili sulla nota A4. In effetti, esattamente il 50% dei soggetti ha discriminato correttamente le condizioni di presenza o assenza di vibrazioni su questa nota, con valore minimo $p(c)=0.69$, e valore medio $p(c)=0.771$. Invece solo un soggetto ($p(c)=0.62$) ha superato la soglia di risposta causale sulla nota A5.

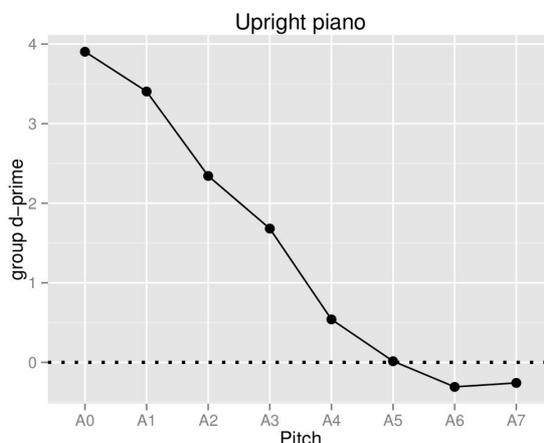


Figura 3: Valori d' di gruppo per il pianoforte verticale. La linea tratteggiata rappresenta la soglia di.

5. Discussione e conclusioni

Secondo i risultati di Askenfelt e Jansson [2], le vibrazioni sui tasti del pianoforte superano le soglie percettive solo in un range ristretto attorno a 200 Hz, corrispondente alla zona di massima sensibilità alla stimolazione vibrotattile. Ciò è contraddetto dai risultati qui presentati, in special modo per altezze sotto ai 110 Hz, dove la percezione è risultata essere molto più chiara che non nel range di massima sensibilità, nel quale invece solo due terzi dei soggetti sono stati in grado di riconoscere la presenza di vibrazioni. Ciò può essere spiegato dalla natura del segnale, che a differenza di quelli usati per determinare soglie percettive [13,14] non è sinusoidale. Soglie più basse sono state rilevate per segnali spettralmente complessi ad esempio sul palmo della mano [15].

La percezione vibrotattile combina informazione proveniente dal canale Paciniano (P) e da 3 canali non-Paciniani (NP I,II,III), aventi risposte in frequenza parzialmente sovrapposte [19]. La soglia di percezione dipende dalla sensibilità di ciascun canale a una determinata frequenza, e segnali sopra soglia possono attivare più di un canale. Il canale P è sensibile soprattutto attorno a 250 Hz, mentre gli NP I,II mediano bande di frequenze più basse. La più alta sensibilità osservata in questo studio potrebbe essere causata da energia relativamente elevata nel range frequenziale del canale P, o in range più bassi che eccedono le soglie dei canali NP. È noto inoltre che nel range frequenziale del canale P la soglia si abbassa per effetti di additività spaziale: Verrillo ha mostrato che a 250 Hz (ma non nelle bande più basse) essa scende di 3 dB quando l'area di contatto si raddoppia [13]. Tuttavia le superfici da lui considerate sono molto piccole, mentre in questo caso possono andare dalla punta del dito fino a tutto il polpastrello.

Le soglie potrebbero essere modificate anche da interazioni cross-modalità tra percezione uditiva e vibrotattile, anche se la letteratura è discorde su questo aspetto. Verrillo [20] ha riscontrato un lieve incremento della soglia vibrotattile in presenza di un suono mascherante. Al contrario, Ro e coautori [21] hanno mostrato che la percezione di uno stimolo vibrotattile è migliorata da un suono con simile contenuto spettrale. Va inoltre osservato che nel caso qui esaminato è presente una pressione attiva

da parte del soggetto, con forze che tipicamente vanno da 1 N (*p* legato) a 50 N (*fff* staccato) [2]. Gli effetti percettivi di tali forze non sono ben compresi, ma c'è evidenza che la sensazione vibrotattile cresce in presenza di una forza statica passiva [22].

Studi in ambito motorio hanno dimostrato che l'applicazione alla pianta del piede di rumore vibratorio sotto soglia riduce la variabilità della camminata e la probabilità di cadute in persone anziane [23], e che soggetti giovani migliorano leggermente l'equilibrio e la locomozione. Il fenomeno fisico alla base di questi risultati è detto *risonanza stocastica*: la presenza di rumore fa sì che un segnale vibrotattile debole raggiunga occasionalmente picchi di ampiezza sopra soglia, stimolando un'adeguata risposta motoria [24]. Pur non essendo disponibili risultati simili per gli arti superiori, è vero che un pianista riceve un forte e spettralmente ricco segnale vibrotattile di attacco, che progressivamente decade lasciando solo le componenti parziali delle note suonate. Un'ipotesi suggestiva – e tutta da verificare – è che non solo l'attacco renda percepibili segnali vibrotattili altrimenti sotto soglia (in analogia con il meccanismo di risonanza stocastica), ma che esso aiuti anche il pianista nel controllo motorio e di conseguenza influenzi la qualità percepita dello strumento in termini di suonabilità.

In conclusione, i risultati di questo studio supportano l'ipotesi che rilevante informazione vibrotattile si trasmetta dal pianoforte allo strumentista attraverso il contatto dita-tastiera, limitatamente al registro basso. Esperimenti futuri saranno volti a generalizzare questi risultati (ad esempio, esplorando altre dinamiche e durate, e su un più ampio campione di tasti), e cercheranno inoltre di gettare luce sul ruolo del feedback vibrotattile nel determinare la qualità percepita di un pianoforte.

6. Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Martin Fröhlich e Kevin Goroway per l'aiuto dato nelle realizzazioni rispettivamente dei setup ZH e PD.

7. Bibliografia

- [1] C. Lappe, S. C. Herholz, L. J. Trainor, and C. Pantev, "Cortical plasticity induced by short-term unimodal and multimodal musical training." *J. Neurosci.*, vol. 28, no. 39, pp. 9632–9, Sep. 2008.
- [2] A. Askenfelt and E. V. Jansson, "On vibration and finger touch in stringed instrument playing," *Music Perception*, vol. 9, no. 3, pp. 311–350, 1992.
- [3] I. Wollman, C. Fritz, and J. Frelat, "Vibrotactile feedback in the left hand of violinists," in *Proc. Acoustics 2012 Nantes Conf.*, S. F. d'Acoustique, Ed., Nantes, France, Apr. 2012.
- [4] S. Nanayakkara, E. Taylor, L. Wyse, and S. H. Ong, "An enhanced musical experience for the deaf: Design and evaluation of a music display and a haptic chair," in *Proc. SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI'09)*. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 337–346.
- [5] M. Marshall and M. Wanderley, "Examining the effects of embedded vibrotactile feedback on the feel of a digital musical instrument," in *Proc. Int. Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME)*, Oslo, Norway, May 30 - June 1 2011, pp. 399–404.
- [6] M. Keane and G. Dodd, "Subjective Assessment of Upright Piano Key Vibrations," *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 97, no. 4, pp. 708–713, Jul. 2011.

- [7] A. Galembo and A. Askenfelt, “Quality assessment of musical instruments - Effects of multimodality,” in Proc. 5th Triennial Conf. of the European Society for the Cognitive Sciences of Music (ESCOM5), Hannover, Germany, Sep. 8-13 2003.
- [8] C. Cadoz, L. Lisowski, and J.-L. Florens, “A Modular Feedback Keyboard Design,” *Comput. Music J.*, vol. 14, no. 2, pp. 47–51, 1990.
- [9] R. B. Gillespie, “Haptic Display of Systems with Changing Kinematic Constraints: The Virtual Piano Action,” Ph.D. dissertation, Stanford University, Jan. 1996.
- [10] R. Oboe and G. De Poli, “A Multi-Instrument, Force-Feedback Keyboard,” *Comput. Music J.*, vol. 30, no. 3, pp. 38–52, Sep. 2006.
- [11] E. Guizzo, “Keyboard maestro,” *IEEE Spectrum*, vol. 47, no. 2, pp. 32–33, Feb. 2010.
- [12] F. Fontana, S. Papetti, M. Civolani, V. dal Bello, and B. Bank, “An exploration on the influence of vibrotactile cues during digital piano playing,” in Proc. Int. Conf. on Sound Music Computing (SMC2011), Padua, Italy, 2011, pp. 273–278.
- [13] T. Verrillo, “Vibrotactile thresholds measured at the finger,” *Perception and Psychophysics*, vol. 9, no. 4, pp. 329–330, 1971.
- [14] T. Verrillo, “Psychophysics of vibrotactile stimulation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 77, no. 1, pp. 225–232, Jan. 1985.
- [15] L. Wyse, S. Nanayakkara, P. Seekings, S. Ong, and E. Taylor, “Palm-area sensitivity to vibrotactile stimuli above 1 kHz,” in Proc. Int. Conf. on New Interfaces for Musical Expression (NIME), 2012.
- [16] R. Morey, “Confidence intervals from normalized data: A correction to Cousineau (2005),” *Tutorial in Quantitative Methods for Psychology*, vol. 4, no. 2, pp. 61–64, 2008.
- [17] D. Green and J. Swets, Eds., *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley, 1966.
- [18] N. Macmillan and C. Creelman, Eds., *Detection theory, A user’s guide*. London New York: Psychology Press, 2005.
- [19] T. Bolanowski, G. Gescheider, R. Verrillo, and C. Checkosky, “Four channels mediate the mechanical aspects of touch,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, no. 5, pp.1680–1694, 1988.
- [20] T. Verrillo and A. Capraro, “Effect of simultaneous auditory stimulation on vibrotactile thresholds,” *Perception and Psychophysics*, vol. 16, no. 3, pp. 597–600, 1974.
- [21] T. Ro, J. Hsu, N. E. Yasar, L. C. Elmore, and M. S. Beauchamp, “Sound enhances touch perception.” *Exp. Brain Res.*, vol. 195, no. 1, pp. 135–43, May 2009.
- [22] J. Craig and C. Sherrick, “The role of skin coupling in the determination of vibrotactile spatial summation,” *Perception and Psychophysics*, vol. 6, no. 2, pp.97–101, 1969.
- [23] A. M. Galica, H. G. Kang, A. A. Priplata, S. E. D’Andrea, O. V. Starobinets, F. A. Sorond, L. A. Cupples, and L. A. Lipsitz, “Subsensory vibrations to the feet reduce gait variability in elderly fallers,” *Gait & Posture*, vol. 30, no. 3, pp. 383 – 387, 2009.
- [24] J. Collins, A. Priplata, D. Gravelle, J. Niemi, J. Harry, and L. Lipsitz, “Noise-enhanced human sensorimotor function,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 22, no. 2, pp. 76–83, March 2003.