

## UN PROTOTIPO DI PIANOFORTE DIGITALE CON FEEDBACK VIBROTATTILE

**Federico Fontana**

Università di Udine

Dept. of Mathematics and Computer Science

via delle Scienze 206, Udine 33100, Italy

federico.fontana@uniud.it

**Hanna Järveläinen, Stefano Papetti**

Zürcher Hochschule der Künste

Inst. for Computer Music and Sound Technology

Pfingstweidstrasse 96, Zurich 8031, Switzerland

name.surname@zhdk.ch

**Federico Avanzini**

Università di Padova

Dept. of Information Engineering

Via G. Gradenigo 6/b, Padova 35131, Italy

avanzini@dei.unipd.it

**Giorgio Klauer, Lorenzo Malavolta**

Conservatorio di Musica "Cesare Pollini"

Via Eremitani 18, Padova 35121, Italy

name.surname@gmail.com

### ABSTRACT

Questo lavoro presenta i risultati di due esperimenti percettivi compiuti su un prototipo di pianoforte digitale aumentato. L'obiettivo di entrambi gli esperimenti era studiare la percezione da parte del pianista di feedback vibrotattile sulla tastiera. Nel primo esperimento i soggetti coinvolti dovevano suonare liberamente al variare del feedback, e fornire un giudizio sulla qualità percepita dello strumento in una griglia di cinque attributi: controllo dinamico, ricchezza, coinvolgimento, naturalezza, e preferenza complessiva. Nel secondo esperimento si è misurata l'accuratezza (in termini di tempo e di controllo dinamico) nell'esecuzione di una scala, al variare del feedback. I risultati mostrano una preferenza per le condizioni in cui è presente feedback vibrotattile, tuttavia per quanto riguarda l'accuratezza dell'esecuzione non sono state osservate differenze significative tra le diverse condizioni.

### 1. INTRODUZIONE

Lo studio della percezione vibrotattile nell'ambito delle interfacce musicali è un tema di ricerca molto attivo, a partire da strumenti tradizionali come pianoforte e violino [1, 2] fino al design di nuovi strumenti con applicazioni alla interazione musicale e alla didattica [3, 4]. Uno dei principali obiettivi di tale ricerca è quantificare l'effetto delle proprietà tattili di uno strumento sulla qualità percepita e la preferenza soggettiva, e in ultima analisi sull'esperienza e la performance dell'esecutore.

Per quanto riguarda il pianoforte, la simulazione delle proprietà tattili della tastiera ha finora riguardato soprattutto la risposta meccanica dei tasti [5, 6], anche sulla base di noti esperimenti che evidenziano una spiccata sensibilità dei pianisti rispetto alla meccanica della tastiera [7].

Più di recente la ricerca ha cominciato ad analizzare il ruolo percettivo delle vibrazioni dello strumento sulla tastiera [8], anche alla luce di alcuni nuovi prodotti industriali [9]. In particolare si è dimostrato [10] che tali vibrazioni sono chiaramente percepite attraverso le dita e si è ipotizzato che il pianista le avverta anche quando la loro ampiezza è al di sotto delle soglie soggettive tipicamente stimate in psicofisica considerando stimoli sinusoidali [11].

Tali risultati contraddicono solo apparentemente quelli di precedenti esperimenti [1], nei quali non si erano considerati i complessi effetti "additivi" (temporali, spaziali, spettrali) associati al contatto contemporaneo di più dita sulla tastiera né, cosa ancora più importante, il ruolo del tocco attivo rispetto a una semplice stimolazione passiva: in effetti, in tali condizioni le soglie di sensibilità vibrotattile si abbassano notevolmente rispetto a quelle note nella letteratura precedente [12].

Questo lavoro si concentra sull'effetto che diversi tipi di feedback vibrotattile producono sul pianista in termini di qualità percepita [13]. A tal fine, si è messo a punto un setup che utilizza un pianoforte digitale commerciale a cui sono stati applicati due attuatori in grado di creare segnali vibratorii alla tastiera. Si sono poi creati due bank di segnali di vibrazione da utilizzare con gli attuatori, contenenti rispettivamente vibrazioni reali misurate su un pianoforte acustico e vibrazioni sintetiche generate *ad hoc*.

Questo setup è servito per due esperimenti con pianisti, il primo sulla qualità percepita, il secondo sulla accuratezza della performance. I risultati mostrano che il setup aumentato con vibrazioni è stato in generale considerato migliore di quello privo di vibrazioni, con una leggera preferenza per vibrazioni di ampiezza enfatizzata rispetto a quella di un pianoforte acustico reale. D'altro canto non è stato apprezzato alcun effetto significativo delle vibrazioni sulla accuratezza (in termini di tempo e di controllo dinamico) della performance.

### 2. IL SETUP SPERIMENTALE

Si è utilizzata la tastiera di un pianoforte digitale Viscount Galileo VP-91, separandola dal proprio case metallico e



**Figura 1.** Il setup sperimentale installato presso il Conservatorio di Padova.



**Figura 2.** Uno dei due trasduttori utilizzati per erogare vibrazioni alla tastiera.

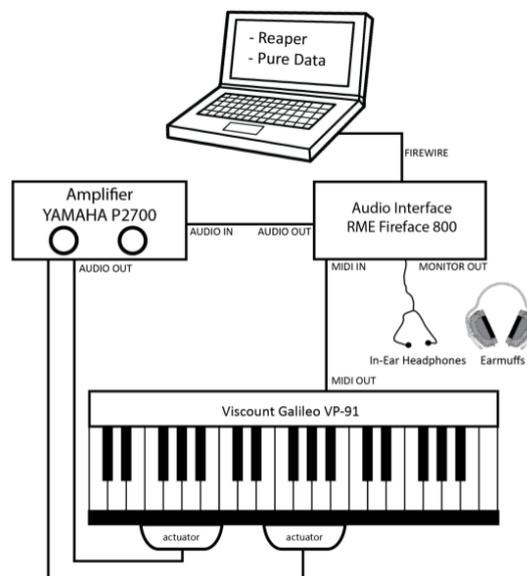
innestandola su una spessa tavola di legno, come illustrato in Fig. 1. Sotto alla tavola sono stati montati due trasduttori Clark Synthesis TST239 Silver Tactile in corrispondenza dei registri grave e medio, come mostrato in Fig. 2, allo scopo di erogare vibrazioni nelle zone più rilevanti della tastiera [10]. Sul lato inferiore della tastiera equipaggiata in tal modo è stata posizionata della gommapiuma al fine di minimizzare l'interazione meccanica tra la tastiera stessa e lo stand su cui è stata posizionata.

I trasduttori sono stati collegati a un amplificatore Yamaha P2700 in configurazione dual mono, con un segnale di ingresso proveniente da una scheda RME Fireface 800 interfacciata via Firewire a un Apple MacBook Pro, quest'ultimo con il ruolo di generare feedback audio e tattile usando il software Reaper 4<sup>1</sup> configurato con i seguenti plugin: il sintetizzatore a modelli fisici Pianoteq 4.5 per la sintesi di suono di pianoforte (erogato al pianista tramite cuffie), e il campionatore Kontakt 5<sup>2</sup> in serie con l'equalizzatore parametrico MeldaProduction MEqualizer<sup>3</sup> per

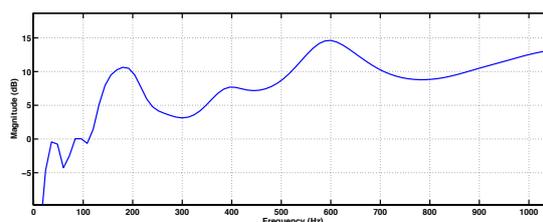
<sup>1</sup> [www.reaper.fm](http://www.reaper.fm)

<sup>2</sup> [www.native-instruments.com](http://www.native-instruments.com)

<sup>3</sup> [www.meldaproduction.com](http://www.meldaproduction.com)



**Figura 3.** Schema del setup.



**Figura 4.** Curva di equalizzazione media nella catena trasmissione-trasduzione.

la resa delle vibrazioni.

La Fig. 3 mostra lo schema di questo setup. Lo stesso computer è stato utilizzato per condurre i test e raccogliere i dati sperimentali, tramite patch sviluppate *ad hoc* per l'ambiente real-time Pure Data,<sup>4</sup> come descritto più in dettaglio nelle prossime sezioni.

## 2.1 Equalizzazione spettrale

Una limitazione del setup appena descritto è che la funzione di trasferimento tra i segnali di vibrazione in uscita dalla scheda audio e quelli rilevati sulla tastiera non è piatta, sia a causa della risposta del sistema meccanico tastiera-tavola di legno, sia perché i trasduttori hanno un notch pronunciato intorno ai 300 Hz. Si è quindi misurata la risposta in frequenza dell'intera catena trasmissione-trasduzione in corrispondenza di tutti i tasti LA e poi stimata una risposta in ampiezza media, la cui inversa è stata utilizzata come filtro di equalizzazione: si veda la Fig. 4, notando in particolare che il notch a 300 Hz viene compensato assieme alle risonanze e anti-risonanze del sistema meccanico.

Questa risposta è stata ulteriormente approssimata all'interno del plugin MEqualizer utilizzando un filtro shel-

<sup>4</sup> [puredata.info](http://puredata.info)

ving con una pendenza di 18 dB nel range [100, 600] Hz, in serie con un filtro risonante del secondo ordine per approssimare il picco a 180 Hz.

## 2.2 Segnali di vibrazione

Il banco di segnali di vibrazioni reali è stato ottenuto da misure effettuate su un pianoforte acustico Disklavier Yamaha DC3 M4 usando un accelerometro piezoelettrico Wilcoxon Research 736 con Intelligent Transmitter iT100M connesso alla scheda audio. L'accelerometro è stato assicurato a ciascun tasto con del Pongo.<sup>5</sup> Sfruttando il controllo MIDI del Disklavier si sono potute misurare le vibrazioni generate all'abbassarsi di ciascun tasto con diversi valori di velocity (12, 23, 34, 45, 56, 67, 78, 89, 100, 111).

Il banco di vibrazioni sintetiche è stato costruito in modo da mantenere gli stessi involuppi di ampiezza dei corrispondenti segnali reali, cambiandone solo il contenuto spettrale. Più precisamente, per ogni nota e ogni valore di velocity si è (1) generato rumore bianco limitato nella banda tattile [11] [20, 500] Hz, (2) passato questo rumore attraverso un filtro risonante del secondo ordine centrato sulla frequenza fondamentale della nota, (3) modulato il segnale risultante con l'involuppo di ampiezza del corrispondente campione reale (involuppo stimato dalla "energy decay curve" del campione tramite integrale di Schroeder [14]). Il campione sintetico così ottenuto è stato equalizzato in energia al corrispondente campione reale.

Questi due banchi di vibrazioni reali e sintetiche sono stati forniti al campionatore Kontakt 5, a cui è stata demandata l'interpolazione tra campioni in funzione del valore di velocity MIDI.

## 2.3 Calibrazione della dinamica

I tasti del Disklavier e del pianoforte digitale Galileo hanno risposte dinamiche molto diverse a causa delle loro diverse meccaniche e masse. Poiché i pianisti adattano il proprio tocco in funzione di tali differenze, è stato necessario calibrare la tastiera digitale secondo una procedura soggettiva per equalizzare la sua dinamica a quella del Disklavier e quindi assicurare che, quando un pianista suona la tastiera digitale a una certa dinamica, viene triggerato il corrispondente campione di vibrazione registrato sul Disklavier.

A tal fine, con l'ausilio di un pianista esperto si è utilizzata la routine di calibrazione soggettiva di Pianoteq, prima sul Disklavier e poi sulla tastiera digitale. Avendo ottenuto – come previsto – due mapping di velocity molto diversi, si è poi utilizzato un filtro MIDI in Reaper per mappare ogni punto della mappa di velocity sulla tastiera digitale nel corrispondente punto sulla mappa del Disklavier. La configurazione così ottenuta è stata successivamente testata da due ulteriori pianisti per un'ulteriore conferma qualitativa della sua accettabilità e affidabilità.

## 2.4 Calibrazione della loudness

L'ultimo passo di calibrazione del setup è consistito nell'equalizzare la loudness del suono di pianoforte sintetico

Pianoteq, erogato al pianista tramite cuffie, con quella del Disklavier.

A tal fine, si sono registrate le note LA del Disklavier con diversi valori di velocity, usando una testa artificiale KEMAR<sup>6</sup> posizionata in corrispondenza del pianista [10]. Si sono poi effettuate ulteriori registrazioni facendo indossare alla testa KEMAR le cuffie del setup sperimentale, ovvero degli auricolari Sennheiser CX 300-II a loro volta ricoperti da cuffie passive anti-rumore 3M Peltor X5, e generando le stesse note LA e le stesse velocity con Pianoteq. Infine, comparando questi due set di registrazioni, la loudness del pianoforte sintetico è stata adattata a quella del Disklavier utilizzando la funzionalità di "volume mapping" in Pianoteq, che permette di regolare in maniera indipendente il volume di ciascun tasto.

## 3. VALIDAZIONE SPERIMENTALE

I due esperimenti descritti di seguito hanno coinvolto 11 partecipanti, di cui 5 donne e 6 uomini, con età media di 26 anni ed esperienza media di 8 anni nello studio del pianoforte a livello di Conservatorio. Due partecipanti erano pianisti jazz, i rimanenti pianisti classici. Tutti hanno firmato un modulo di consenso informato. La durata media di una sessione comprendente entrambi gli esperimenti è stata di circa un'ora.

I partecipanti hanno svolto la sessione sperimentale usando il setup descritto in precedenza (Fig. 3) e indossando auricolari e cuffie anti-rumore allo stesso modo della testa KEMAR durante la procedura di equalizzazione di loudness descritta sopra. Questo è servito a evitare che i partecipanti sentissero il feedback sonoro generato dai trasduttori come effetto collaterale della loro vibrazione, e che percepissero invece solo gli stimoli audio-tattili generati in tempo reale in risposta al loro tocco sulla tastiera, ed erogati rispettivamente in cuffia e sulla tastiera stessa.

### 3.1 Esperimento 1: qualità percepita

In questo esperimento sono state prese in considerazione quattro diverse condizioni di vibrazione, tutte associate al medesimo feedback uditivo (generato tramite Pianoteq secondo quanto già descritto):

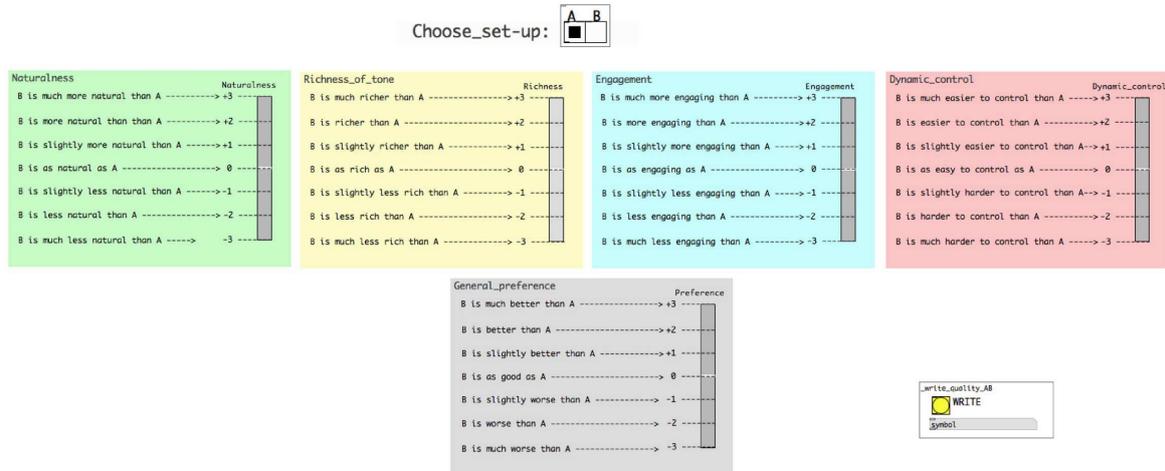
- A: nessuna vibrazione;
- B: vibrazioni reali;
- C: vibrazioni reali, con un boost di 9 dB;
- D: vibrazioni sintetiche.

Ogni partecipante doveva suonare liberamente la tastiera digitale, senza alcuna restrizione di dinamica o range, e valutare la propria esperienza su cinque categorie di giudizio: "controllo dinamico", "ricchezza", "coinvolgimento", "naturalità", "preferenza globale". Queste categorie sono state scelte sulla base di recenti ricerche sulla valutazione della qualità di violini [2].

Ogni partecipante poteva commutare liberamente tra due condizioni,  $\alpha$  e  $\beta$ :  $\alpha$  corrispondeva sempre a quella senza vibrazioni (A), mentre  $\beta$  era una delle tre condizioni con

<sup>5</sup> <http://www.fila.it/en/pongo/history/>

<sup>6</sup> Knowles Electronic Manikin for Acoustic Research, un manichino comunemente utilizzato per registrazioni e misure binaurali.



**Figura 5.** Interfaccia grafica usata dai partecipanti per commutare tra le condizioni (A,B) e per indicare i punteggi sulle cinque categorie di giudizio.

vibrazioni (B, C, D), per un totale quindi di tre possibili coppie  $(\alpha, \beta)$ . Tuttavia i partecipanti non erano informati di quali fossero le differenze tra le due condizioni, e in particolare che il feedback uditivo rimaneva sempre invariato.

Il tempo di valutazione per una coppia di condizioni  $(\alpha, \beta)$  era di 10 minuti, durante i quali il partecipante poteva in ogni momento esprimere o modificare i propri punteggi sulle cinque categorie di giudizio, e commutare tra le due condizioni, usando un'interfaccia grafica realizzata in Pure Data e visibile in Fig. 5. Al termine dei 10 minuti si passava alla coppia successiva. Le coppie e condizioni all'interno di esse erano randomizzate tra i partecipanti.

Per i giudizi si è usata una scala continua di tipo "Comparison Category Rating" (CCR) tra  $-3$  e  $+3$ , tipica per test di qualità soggettiva nelle tecnologie di comunicazione (ITU-T P.800). I partecipanti muovevano uno slider lungo la scala continua per esprimere la propria opinione. La scala riportava le seguenti indicazioni:

- +3: " $\beta$  molto meglio di  $\alpha$ "
- +2: " $\beta$  meglio di  $\alpha$ "
- +1: " $\beta$  leggermente meglio di  $\alpha$ "
- 0: " $\beta$  uguale a  $\alpha$ "
- 1: " $\beta$  leggermente peggio di  $\alpha$ "
- 2: " $\beta$  peggio di  $\alpha$ "
- 3: " $\beta$  molto peggio di  $\alpha$ "

### 3.2 Esperimento 2: accuratezza della performance

L'unica differenza tra il setup di questo esperimento e quello del precedente è la presenza in cuffia di un suono di metronomo a 120 BPM. Inoltre in questo esperimento si sono utilizzate solo le condizioni A e B descritte sopra.

Ogni partecipante doveva suonare una scala ascendente e discendente di RE maggiore, al tempo scandito dal metronomo, a tre diverse dinamiche costanti (*pp*, *mf*, *ff*). La scala andava eseguita sulle tre ottave più gravi (quindi con la sola mano sinistra) al fine di massimizzare il feedback tattile. Ogni dinamica veniva ripetuta tre volte, per entram-

be le condizioni A e B, arrivando a un totale di 18 ripetizioni randomizzate. A ogni ripetizione venivano registrati con Pure Data i corrispondenti dati MIDI (note ON, lunghezza della nota, velocity), da utilizzare successivamente per analizzare la performance.

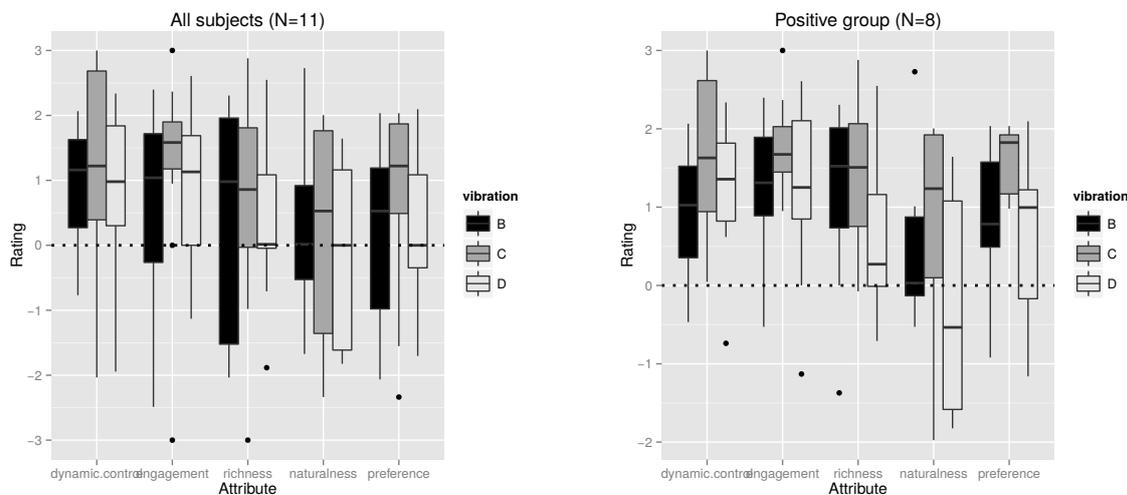
## 4. RISULTATI SPERIMENTALI

### 4.1 Qualità percepita

Per quantificare la consistenza intersoggettiva sono stati calcolati i valori di correlazione di concordanza di Lin  $\rho_c$  tra tutte le coppie di partecipanti [15]. I valori medi ottenuti sono  $\rho_c = 0.018$  per "preferenza globale",  $\rho_c = 0.006$  per "controllo dinamico",  $\rho_c = -0.04$  per "ricchezza",  $\rho_c = -0.02$  per "coinvolgimento", e  $\rho_c = -0.04$  per "naturalità". Per tutte le categorie, alcuni soggetti erano in completo accordo o disaccordo, e a causa di questa alta variabilità i valori di  $\rho_c$  non si discostano significativamente da 0 per nessuna categoria ( $t(54) < 0.77, p > 0.05$ ). Questi bassi valori di concordanza indicano un alto grado di disaccordo tra i partecipanti.

Le risposte sono correlate positivamente tra tutte le categorie di giudizio. La correlazione più debole è quella tra "ricchezza" e "controllo dinamico" (correlazione di Spearman  $\rho_s = 0.18$ ), mentre quella più forte è quella tra "preferenza globale" e "coinvolgimento" ( $\rho_s = 0.75$ ). Le rimanenti correlazioni tra "preferenza globale" e le altre categorie sono le seguenti:  $\rho_s = 0.39$  per "controllo dinamico",  $\rho_s = 0.72$  per "ricchezza", e  $\rho_s = 0.57$  per "naturalità".

La Fig. 6 mostra i risultati, mentre i giudizi medi per ogni categoria e condizione di vibrazione sono riportati in Tabella 1. In media tutte le condizioni con vibrazione vengono preferite a quella senza vibrazioni, con l'unica eccezione della condizione D per la categoria "naturalità". La medesima categoria ha punteggi solo marginalmente positivi per le condizioni B e C. Le preferenze più evidenti sono quelle per "range dinamico" e "coinvolgimento", mentre quelle per "preferenza globale" e "ricchezza" sono



**Figura 6.** Esperimento 1: box-plot con mediane e quartili per ogni categoria e per ogni condizione con vibrazione.

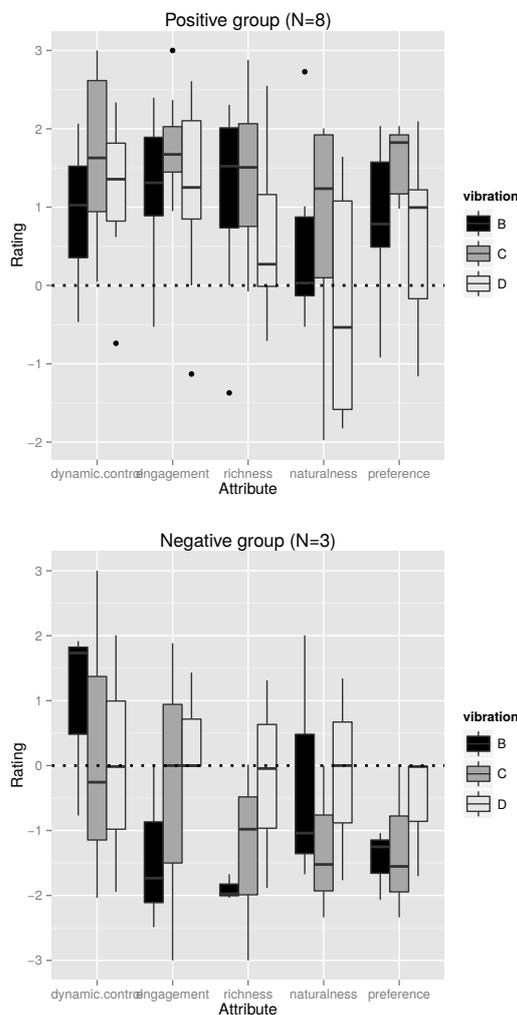
Condiz.	Contr.	Ricch.	Coinv.	Natur.	Globale
B	0.92	0.30	0.50	0.26	0.24
C	1.28	0.67	1.21	0.17	0.81
D	0.87	0.42	1.00	-0.23	0.29

**Tabella 1.** Esperimento 1: giudizi medi su tutti i soggetti per ogni categoria e per ogni condizione con vibrazione.

più basse e molto simili tra loro. La condizione C è quella più spesso preferita tra tutte quelle con vibrazione, e riceve i punteggi più alti in quattro categorie su cinque. Si noti però che B viene considerata la condizione più naturale, anche se ha giudizi più bassi su tutte le altre categorie.

Poiché per i dati non sussiste la condizione di normalità ai fini dell'analisi della varianza, si è utilizzato un test non parametrico di Friedman sulle differenze tra misure ripetute, per analizzare i giudizi di preferenza. Il test fornisce un valore Chi-quadrato di 21.9 ( $p < 0.05$ ), suggerendo una differenza significativa tra le condizioni con vibrazioni. D'altro canto, il test di Wilcoxon sull'ipotesi che la mediana sia positiva non ha fornito significatività in nessuna delle condizioni (B:  $V = 37.5, p > 0.05$ ; C:  $V = 41, p > 0.05$ ; D:  $V = 28, p > 0.05$ ).

L'alta variabilità intersoggettiva discussa all'inizio della sezione è associata a una alta eterogeneità nei dati. Utilizzando un algoritmo K-means di clusterizzazione per dividere *a posteriori* i partecipanti in due categorie rispetto ai giudizi di "preferenza globale", otto partecipanti sono stati classificati in un gruppo "positivo" e i restanti tre in un gruppo "negativo". La Fig. 7 mostra i risultati per questi due gruppi. Si osservi l'evidente differenza di giudizi: la media per la condizione preferita C è quasi +2 nel gruppo positivo, e circa -1.5 nel gruppo negativo. La mediana nel gruppo positivo è  $> 0$  in tutti i casi tranne uno ("naturalness", D), mentre in quello negativo è positiva solamente in un caso ("controllo dinamico, B).

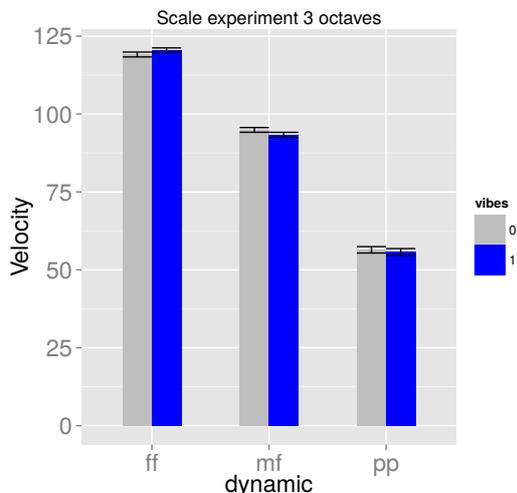


**Figura 7.** Esperimento 1: gli stessi box-plot di Fig. 6, divisi per i gruppi "positivo" e "negativo".

#### 4.2 Accuratezza della performance

L'ipotesi sperimentale è che, se la presenza di vibrazioni sulla tastiera influisce sulla performance dei partecipanti in termini di tempo e dinamica, allora tali effetti devono essere visibili nei valori medi e nelle varianze delle velocity e degli intervalli inter-onset (inter-onset-intervals, IOI) calcolati dai dati MIDI.

I valori medi di velocity per ogni partecipante sono stati calcolati come le medie tra le tre ripetizioni della scala all'interno della stessa condizione e della stessa dinamica. La Fig. 8 mostra i risultati. Per la dinamica *ff* i valori sono leggermente più alti in presenza di vibrazioni, mentre per la dinamica *mf* la situazione si capovolge. Tuttavia, un'analisi tramite ANOVA a misure ripetute mostra che non ci sono differenze significative tra condizioni di vibrazione ( $F(1, 2826) = 2.27, p > 0.05$ ), e che non c'è interazione tra condizioni di vibrazione e dinamica ( $F(2, 2826) = 0.83, p > 0.05$ ). La non significatività permane anche se si restringe l'analisi all'otta-



**Figura 8.** Esperimento 2: valori medi di velocity e intervalli di confidenza al 95% [16].

va più grave, dove la percezione delle vibrazioni è massima. Allo stesso modo, non vi è una differenza significativa delle deviazioni standard (standard deviations,  $sd_A$  e  $sd_B$ ) tra le due condizioni: gli intervalli di confidenza al 95% stimati da t-test a campioni dipendenti ( $df=10$ ) includono  $\mu(sd_B) - \mu(sd_A) = 0$  per tutte le dinamiche.

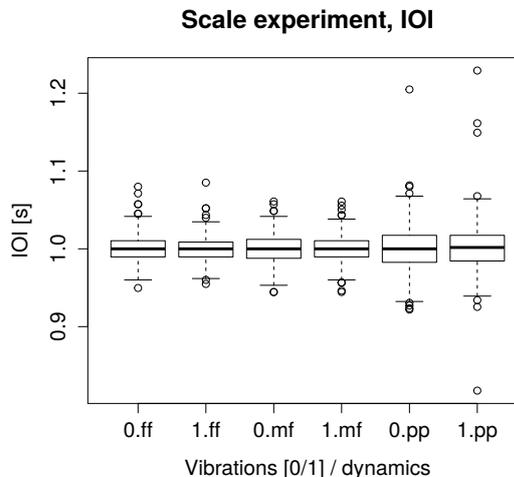
Gli IOI risultano molto stabili tra le due condizioni di vibrazione. Si osserva una maggiore variabilità per la dinamica *pp*, ma senza alcun effetto della vibrazione (si veda la Fig. 9). Allo stesso modo le durate delle note sono stabili, suggerendo che non vi siano differenze significative tra le due condizioni in termini di articolazione.

### 5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I risultati sperimentali mostrano che la presenza di vibrazioni sulla tastiera aumenta la qualità percepita di un pianoforte digitale. Inoltre, una resa amplificata (+9 dB) delle vibrazioni reali sembra essere complessivamente preferita a un'altra più fedele alla realtà, sebbene quest'ultima venga percepita come più naturale. Un secondo risultato interessante è che l'unico caso in cui la condizione senza vibrazione viene preferita a un'altra si ha per la categoria "naturalità" e per le vibrazioni sintetiche. Questo suggerisce che i pianisti siano sensibili alla coerenza inter-sensoriale tra il feedback uditivo e quello tattile.

Le categorie di giudizio maggiormente correlate alla "preferenza globale" sono "coinvolgimento" ( $\rho_s = 0.75$ ) e "ricchezza" ( $\rho_s = 0.72$ ). Questo risultato è comparabile a quanto mostrato in un recente studio sulla valutazione della qualità di violini, nel quale si è trovata una forte correlazione tra le categorie "ricchezza" e "preferenza globale" [2].

La bassa concordanza tra i partecipanti suggerisce che la consistenza intra- e inter-soggettiva sia un elemento di fondamentale importanza da considerare in esperimenti di valutazione di qualità di strumenti musicali. In questo studio non è stato possibile valutare il grado di consistenza



**Figura 9.** Esperimento 2: box-plot con mediane e quartili degli IOI.

za intra-soggettiva, dal momento che ogni partecipante ha fornito un unico giudizio per ogni condizione e categoria di giudizio. Questo tipo di valutazione verrà incluso in esperimenti futuri.

Va tuttavia sottolineato che l'eterogeneità nei dati sperimentali è presente in egual modo in tutte le categorie di giudizio e in tutte le condizioni: risulta quindi difficile credere che tale eterogeneità provenga unicamente da inconsistenza nelle risposte. All'incirca due terzi dei partecipanti ha espresso una chiara preferenza per le condizioni con vibrazioni (e, tra queste, un apprezzamento lievemente più basso per le vibrazioni sintetiche), mentre il rimanente terzo ha espresso un'opinione opposta.

A questo proposito, è interessante notare che i due pianisti jazz, probabilmente più abituati dei pianisti classici a suonare su pianoforti digitali, rientrano entrambi nel gruppo "negativo". Questa circostanza potrebbe suggerire che essi percepiscono una tastiera vibrante come meno piacevole di una neutra coerentemente con la propria esperienza pregressa. Alla luce di queste considerazioni, futuri esperimenti dovranno *a priori* considerare pianisti classici e non come appartenenti a gruppi sperimentali distinti, e dovranno inoltre includere dettagliate interviste post-sperimentali per raccogliere l'esperienza pregressa e le osservazioni dei partecipanti.

Il secondo esperimento non ha evidenziato differenze nella performance dei partecipanti in funzione della presenza o meno di vibrazioni. Probabilmente il task scelto (tre ottave di scala di RE maggiore a tempo relativamente basso) era troppo facile da svolgere accuratamente in qualsiasi condizione. E d'altra parte alcuni recenti studi mostrano che i pianisti usano informazione vibrotattile come mezzo per regolare l'accuratezza temporale [17, 18], anche se il ruolo delle vibrazioni sulla tastiera rimane non chiarito. Altri studi mostrano che la presenza di feedback vibrotattile migliora l'accuratezza in task di pressione con le dita, in termini di forza erogata [19, 20].

Il secondo esperimento non ha quindi chiarito se la presenza di vibrazioni sul tasto premuto dal pianista possa aiutare la pianificazione motoria dell'azione sul tasto successivo. Tuttavia il fatto che la categoria "controllo dinamico" abbia ricevuto giudizi molto positivi per tutte le condizioni con vibrazioni lascia supporre che la presenza di feedback tattile non venga apprezzata solo per un effetto di maggiore coinvolgimento, ma che venga anche percepita come di aiuto nella performance.

Futuri esperimenti dovranno utilizzare task performativi diversi, in cui l'informazione fornita dal feedback tattile sia più significativa che non in quello considerato qui. Ad esempio, un task più appropriato potrebbe essere una serie di ripetizioni di accordi di durata sufficientemente lunga, in cui il pianista debba mantenere una dinamica costante: in questo caso le vibrazioni e i loro inviluppi temporali sarebbero percepiti più chiaramente e potrebbero aiutare maggiormente il controllo e la pianificazione motoria.

### Ringraziamenti

Questa ricerca è stata parzialmente supportata dal progetto AHMI (Audio-Haptic modalities in Musical Interfaces), finanziato dalla Swiss National Science Foundation (SNSF).

### 6. REFERENCES

- [1] 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.
- [2] C. Saitis, B. L. Giordano, C. Fritz, and G. P. Scavone, "Perceptual evaluation of violins: A quantitative analysis of preference judgments by experienced players," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, no. 6, pp. 4002–4012, 2012.
- [3] 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), pp. 399–404, May 30 - June 1 2011.
- [4] M. Giordano and M. M. Wanderley, "Perceptual and technological issues in the design of vibrotactile-augmented interfaces for music technology and media," in *Haptic and Audio Interaction Design* (I. Oakley and S. Brewster, eds.), vol. 7989 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 89–98, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] C. Cadoz, L. Lisowski, and J.-L. Florens, "A Modular Feedback Keyboard Design," *Comput. Music J.*, vol. 14, no. 2, pp. 47–51, 1990.
- [6] R. Oboe and G. De Poli, "A Multi-Instrument, Force-Feedback Keyboard," *Comput. Music J.*, vol. 30, pp. 38–52, Sept. 2006.
- [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] 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), pp. 273–278, 2011.
- [9] E. Guizzo, "Keyboard maestro," *IEEE Spectrum*, vol. 47, pp. 32–33, Feb. 2010.
- [10] F. Fontana, F. Avanzini, H. Järveläinen, S. Papetti, F. Zanini, and V. Zanini, "Perception of interactive vibrotactile cues on the acoustic grand and upright piano," in *Proc. Joint ICMC/SMC Conf.*, 2014.
- [11] T. Verrillo, "Vibrotactile thresholds measured at the finger," *Perception and Psychophysics*, vol. 9, no. 4, pp. 329–330, 1971.
- [12] S. Papetti, H. Järveläinen, and G.-M. Schmid, "Vibrotactile sensitivity in active finger pressing," in *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC2015)*, (Evanston, IL), pp. 457–462, July 2015.
- [13] F. Fontana, F. Avanzini, H. Järveläinen, S. Papetti, G. Klauer, and L. Malavolta, "Rendering and subjective evaluation of real vs. synthetic vibrotactile cues on a digital piano keyboard," in *Proc. Int. Conf. Sound and Music Computing (SMC2015)*, (Maynooth), pp. 161–167, July 2015.
- [14] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, pp. 1187–1188, June 1965.
- [15] L. Lin, "A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility," *Biometrics*, vol. 45, pp. 255–268, 1989.
- [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] W. Goebel and C. Palmer, "Tactile feedback and timing accuracy in piano performance," *Exp. Brain Res.*, vol. 186, pp. 471–479, 2008.
- [18] W. Goebel and C. Palmer, "Finger motion in piano performance: Touch and tempo," in *International symposium for performance science*, 2009.
- [19] H. Järveläinen, S. Papetti, S. Schiesser, and T. Groschauser, "Audio-tactile feedback in musical gesture primitives: Finger pressing," in *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference (SMC2013)*, (Stockholm), 2013.
- [20] T. Ahmaniemi, "Effect of dynamic vibrotactile feedback on the control of isometric finger force," *IEEE Trans. on Haptics*, 2012.