



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE

Università degli studi di Udine

Confronto tra sistemi di rilevamento del gesto basati su sensori a infrarossi o ultrasuoni per applicazioni di pianoforte virtuale

Original

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/11390/1069788> since 2015-12-18T10:31:31Z

Publisher:

Università IUAV di Venezia

Published

DOI:

Terms of use:

The institutional repository of the University of Udine (<http://air.uniud.it>) is provided by ARIC services. The aim is to enable open access to all the world.

Publisher copyright

(Article begins on next page)

CONFRONTO TRA SISTEMI DI RILEVAMENTO DEL GESTO BASATI SU SENSORI A INFRAROSSI O ULTRASUONI PER APPLICAZIONI DI PIANOFORTE VIRTUALE

Yuri De Pra
Università di Verona
Dipartimento di Informatica
Strada le Grazie 15
Verona 37134, Italia
yuridepra@libero.it

Federico Fontana
Università di Udine
Dipartimento di Matematica e Informatica
via delle Scienze 206
Udine 33100, Italia
federico.fontana@uniud.it

Fausto Spoto
Università di Verona
Dipartimento di Informatica
Strada le Grazie 15
Verona 37134, Italia
fausto.spoto@univr.it

SOMMARIO

Presentiamo una tastiera virtuale che mira a sostituire quella del pianoforte con dei tasti in realtà aumentata. Lo sforzo maggiore è stato compiuto nel rilevamento accurato nonché rapido dei movimenti delle mani. Per raggiungere questo obiettivo sono stati confrontati un dispositivo di rilevamento a infrarossi ed uno a ultrasuoni, valutandone pro e contro nell'impiego specifico. Abbiamo poi realizzato un sistema di feedback multimodale riprendendo le azioni delle mani dell'esecutore mediante la fotocamera posteriore di un comune dispositivo mobile, e presentandole all'utente unite alla visualizzazione di una tastiera di pianoforte animata. Connettendo il dispositivo Leap Motion, responsabile del rilevamento a infrarossi, e altri dispositivi hardware per la generazione di stimoli audio e vibrotattili, il prototipo promette potenziali applicazioni come interfaccia musicale mobile a basso costo, trasformando un comune tavolo in uno scenario di realtà aumentata dove possono essere eseguiti semplici esercizi con buona accuratezza e una risposta realistica in assenza di una tastiera reale.

1. INTRODUZIONE

Le interfacce degli strumenti musicali virtuali di nuova concezione sono progettate per assicurare un'esperienza utente completa. Esse emulano, mediante il feedback multimodale, le sensazioni percepite dall'esecutore durante una performance con lo strumento reale. Nello sviluppo di questo tipo di interfacce, non è banale garantire la sincronizzazione nella generazione dei diversi stimoli sensoriali in modo che siano percepiti come un evento unitario. In particolare, la finestra temporale in cui gli stimoli visivi, uditivi e somatosensoriali sono associabili allo stesso evento da parte di un utente è molto ristretta. I diversi esperimenti percettivi che sono stati condotti hanno con buona approssimazione determinato la dimensione massima di tale finestra in 100 ms, nel caso ottimale in cui l'ordine tempo-

rale delle modalità associate agli stimoli sia tattile, uditivo e visuale [1, 2, 3, 4].

I sensori dei dispositivi mobili reperibili oggi sul mercato spesso non possiedono l'accuratezza e la reattività richieste per effettuare il riconoscimento e la gestione di eventi nella finestra temporale precedentemente descritta. Inoltre la gestione delle risorse del sistema operativo tende ad assegnare bassa priorità ai processi audio e video. Nel caso specifico del piano portatile, il riconoscimento della pressione dei tasti e della relativa forza applicata in tempo reale è possibile solo mediante periferiche dedicate collegabili al dispositivo mobile secondo le specifiche MIDI-USB. A tutt'oggi non esiste un'interfaccia immateriale che copra il divario esistente nella qualità dell'interazione tra i software di emulazione su dispositivi mobili e il pianoforte fisico.

Malgrado le difficoltà tecniche che non permettono la realizzazione di interfacce su dispositivi mobili, sono stati realizzati diversi progetti software [5] che permettono il riconoscimento di gesti mediante una videocamera a infrarossi a frequenza di cattura elevata. Inoltre esistono progetti software di realtà aumentata per pianoforte basati su soluzioni desktop [6, 7], e studi sulla loro applicabilità in contesti educativi [8, 9].

Possiamo concepire un contesto in cui l'interazione con il pianoforte avvenga su un comune tavolo di legno su cui viene proiettata o disegnata una tastiera. Un'altra possibile implementazione potrebbe prevedere di visualizzare porzioni di tastiera sullo schermo di un tablet portando l'interazione sul touch-screen del medesimo dispositivo. Esistono diverse applicazioni (oltre 250) che sfruttano questo paradigma di interazione; tra queste citiamo Piano 3D (mobileagency.com.au), Real Piano 3D (imudra tech.), Play Piano (android technologies), Learn Piano, My Piano e Grand Piano.

Gli schermi touch-screen consentono un riconoscimento preciso del tocco a livello spaziale e prevedono la possibilità di generare vibrazioni come risposta agli eventi (anche se non modulabili). D'altra parte essi sono affetti da una considerevole latenza nella trasmissione dell'evento e non prevedono funzioni di stima della forza esercitata dalle dita sulla superficie; tale informazione risulta indispensabile per un'applicazione di pianoforte.

Date queste premesse, sono state ideate e testate diverse

soluzioni hardware e software atte a costruire un sistema a bassa latenza che consentisse di stimare posizione e velocità relativa delle dita della mano. Nel sistema proposto la realtà aumentata viene realizzata sullo schermo del tablet dove viene mostrata la mano dell'esecutore ripresa dall'alto (mediante la videocamera del dispositivo mobile) a cui viene sovrapposto un modello 3D di tastiera del pianoforte in semi-trasparenza. Attualmente il sistema si avvale di un dispositivo mobile Nexus 10 di Samsung, su cui opera Android 4.4.

L'obiettivo di questa ricerca non è riprodurre fedelmente le sensazioni percepite suonando un pianoforte reale, quanto piuttosto ricreare un'esperienza utente accettabile mediante il supporto di un sistema di feedback multimodale. L'assenza della tastiera fisica non compromette totalmente l'esperienza dell'utente, ancorché la sensazione tattile di contatto con una superficie (per esempio un tavolo) debba essere supportata da una pronta, consistente ed accurata risposta audio/video.

La sintesi in tempo reale del suono di pianoforte a oggi ha raggiunto ottimi risultati; è quindi possibile generare suoni realistici mediante campioni di pianoforte o sintesi a modelli fisici. La riproduzione degli stessi può avvenire tramite trasduttori vibro-tattili posizionati sulla superficie di interazione che simulino la radiazione della tavola armonica del pianoforte.

Per quanto riguarda la visualizzazione, un piccolo ritardo è tollerabile qualora sia rispettato l'ordine degli stimoli: tattile, audio, visuale. Nello specifico, sul sistema presentato dovranno essere effettuati esperimenti per quantificare il grado di coesione della risposta multimodale [4].

In questo lavoro riportiamo i risultati della ricerca compiuta per ottenere un'interazione naturale attraverso l'utilizzo del feedback multimodale. In particolare, l'articolo verte principalmente sugli aspetti del riconoscimento delle dita e sulla stima della velocità dei loro movimenti.

2. RICONOSCIMENTO DELLA MANO

I dispositivi mobili di recente fabbricazione sono dotati di fotocamere ad alta risoluzione ma soffrono di problemi di latenza, soprattutto durante le operazioni di autofocus e compensazione che non possono essere disattivate. Come detto precedentemente, latenze video ridotte possono essere accettate dal pianista nell'interazione; d'altra parte i sistemi di riconoscimento basati sulle immagini risultano inutilizzabili qualora affetti da latenze di quest'ordine di grandezza [10]. Per questo motivo abbiamo investigato soluzioni differenti.

2.1 Sistema basato su sensori a infrarossi

I sensori a infrarossi in commercio come Microsoft Kinect™ e Leap Motion™ hanno ottenuto un buon grado di successo come strumenti per il riconoscimento di parti del corpo e di oggetti, consentendo di determinarne la posizione nello spazio e stimarne la velocità dei movimenti. Per quanto riguarda il caso specifico dell'inseguimento della mano il dispositivo più adatto risulta essere Leap Motion, un dispositivo progettato per il tracking della mano e del-

le dita a bassa latenza che prevede l'integrazione con i più diffusi linguaggi di programmazione (C++, Java, Python, etc.). Secondo le specifiche il prodotto consente un grado di precisione sub-millimetrico e un'elevata frequenza di cattura (circa 300 fps), consentendo il riconoscimento di movimenti anche rapidi. In realtà, diversi test hanno evidenziato prestazioni al di sotto delle aspettative per quanto riguarda la robustezza dell'inseguimento nel caso di movimenti rapidi o di condizioni di luce non ottimali [11]. Nel nostro studio sono emersi gli stessi limiti, riportati a conclusione dell'articolo.

Nel caso particolare abbiamo sviluppato un modulo software su un laptop PC Intel Core i3, il quale riceve i dati dal driver del dispositivo di rilevamento e invia le coordinate spaziali ad un'applicazione Android tramite protocollo UDP. L'applicazione è progettata per virtualizzare sullo schermo del dispositivo mobile lo scheletro della mano (Figura 1).

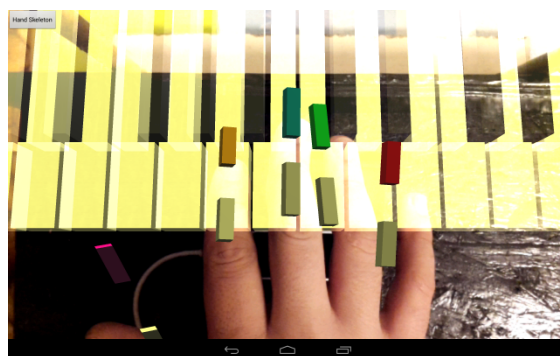


Figura 1. Riconoscimento basato su Leap Motion con virtualizzazione della mano.

Le caratteristiche del sistema di riconoscimento impongono che Leap Motion venga posizionata al di sotto del palmo della mano a una distanza non inferiore a 7 cm; per questo motivo l'utente interagisce con una superficie trasparente agli infrarossi posizionata al di sopra del dispositivo. Questo vincolo limita l'accuratezza della stima della velocità delle dita lungo l'asse di principale importanza per gli scopi dell'applicazione.

Una prima implementazione dell'algoritmo di inseguimento è stata realizzata utilizzando la gesture "key pressed" fornita nativamente dalla API del dispositivo. Tale metodo restituisce la posizione e stima della velocità delle dita sugli eventi riconosciuti. Al seguito di alcuni test preliminari è stato abbandonato l'approccio a causa di eccessivi falsi negativi e positivi nonché di una considerevole latenza¹.

Una successiva implementazione è stata realizzata sulla base delle coordinate spaziali rilevate dal dispositivo e fornite dalla API. Sono state create due soglie virtuali poste ad altezza predeterminata dalla superficie in vetro (2 cm e 0.5 cm): è stato generato un evento di pressione al raggiungimento della seconda soglia ed è stato calcolato il tempo

¹ Al momento della scrittura di questo manoscritto il produttore di Leap Motion ha rilasciato una nuova versione della API, le cui prestazioni a una valutazione preliminare degli autori non appaiono ancora soddisfacenti.

di percorrenza del dito nella finestra per determinarne la velocità. Le prestazioni di questa implementazione sono risultate migliori sia in termini di latenza che di precisione nella cattura degli eventi.

2.2 Sistema basato su sensori a ultrasuoni

Esistono tecniche alternative di riconoscimento, basate per esempio sull'utilizzo di ultrasuoni [12] e dispositivi laser [13] dotati sia di emettitore che di ricevitore. Questi trasduttori sono programmati per emettere a intervalli regolari una data sequenza di impulsi, le cui riflessioni su eventuali ostacoli sono rilevate dal ricevitore. Con questa tecnica si stimano posizione e distanza degli ostacoli. Non abbiamo trovato in letteratura applicazioni di pianoforte basate sul riconoscimento laser o a ultrasuoni.

Abbiamo dunque realizzato un sistema costituito da una matrice di otto sensori a ultrasuoni HC-SR04 (Figura 2) in grado di ottenere un'elevata frequenza di cattura (circa 200 fps) se configurato per riconoscere oggetti posti ad una distanza tra 20 e 30 millimetri; l'elevata frequenza è possibile grazie alla breve distanza percorsa dagli impulsi prima di incontrare l'ostacolo ed esserne riflessi.

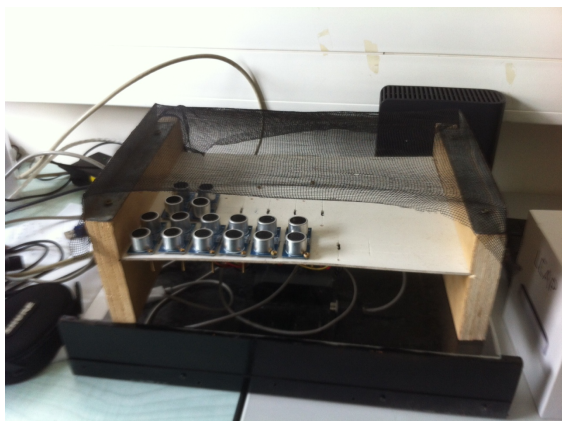


Figura 2. Matrice di sensori a ultrasuoni per 8 tasti.

In una prima implementazione la matrice di sensori è stata pilotata da un microcontrollore Arduino 2009, collegato a sua volta tramite porta seriale a un laptop PC che generava segnali MIDI inviati a un'applicazione Android utilizzando il protocollo UDP (Figura 3). Successivamente è stato utilizzato il controllore Arduino ADK, collegandolo direttamente al dispositivo mobile mediante l'apposita interfaccia seriale mini USB. La seconda implementazione è stata realizzata al fine di ridurre la latenza di comunicazione e aumentare a 14 il numero di sensori pilotabili; per ogni sensore, infatti, è necessario utilizzare un'uscita digitale per inviare il segnale di trigger e un'uscita di tipo PWM per determinare il tempo di riflessione e la corrispondente distanza dell'oggetto.

Il sistema di riconoscimento è basato su un algoritmo operante su tre soglie di distanza, che determina il sensore coinvolto e stima la velocità del dito durante la discesa. Per determinare la velocità viene trasmesso il tempo del microprocessore in ogni frame generato nel superamento di una delle soglie stabilite per un determinato sensore.

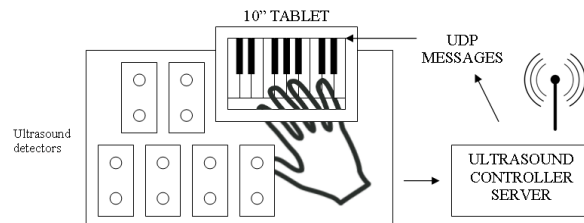


Figura 3. Sistema di realtà aumentata con rilevamento a ultrasuoni.

Nel messaggio inviato all'applicazione è stato inserito il numero del sensore, il valore di soglia e il tempo di generazione in modo da evitare distorsioni nell'informazione dovuti al canale di comunicazione. Il calcolo della velocità e la creazione dell'immagine dello stato del sistema sono stati demandati all'applicazione Android. Le tre soglie servono a determinare rispettivamente: il punto di attivazione del sensore, l'inizio del calcolo della velocità e il punto finale dell'azione. Una corretta configurazione delle soglie permette di sviluppare strategie predittive che possono compensare i ritardi di altri componenti del sistema nell'elaborazione dell'informazione

3. FEEDBACK

Come detto in precedenza la mano viene visualizzata sullo schermo del tablet sovrapposta alla tastiera virtuale. Per fare ciò è stata usata la fotocamera del sistema mobile, e quindi la visualizzazione risulta affetta da una latenza a oggi irriducibile. Il risultato è comunque piacevole data la risposta coerente del sistema alle azioni compiute dall'utente: risultano infatti sincronizzate, sebbene affette da latenza, la visualizzazione della mano e dei movimenti dei tasti controllati dal sistema. La visualizzazione sullo schermo del tablet può essere sostituita da altri riferimenti visivi (es. tastiera disegnata o proiettata su un tavolo); ogni possibile opzione dovrà essere valutata da rigorosi esperimenti.

La parte relativa all'audio non è stata considerata prioritaria in questo stadio della ricerca: al momento viene utilizzato un set di campioni di pianoforte PCM di buona qualità. La parte riguardante il feedback aptico è stata meno esplorata, ma dovrà essere effettuato ulteriore lavoro di ricerca al fine di simulare la resistenza del tasto del pianoforte quando viene premuto. Riportiamo sotto i risultati riguardanti questa problematica.

3.1 Feedback Tattile

Riprodurre, anche parzialmente, la consistenza di un tasto di pianoforte in modo virtuale non è banale. In letteratura sono state studiate tecnologie basate su ultrasuoni [14, 15], generazione di vortici d'aria [16] e repulsione magnetica [17] al fine di riprodurre la materialità di oggetti virtuali interattivi, ottenendo promettenti risultati. È stato fatto un tentativo di applicare tali tecnologie nel contesto della riproduzione del tasto di pianoforte considerando le esigenze di portabilità del sistema.

Nel caso dell'inseguimento visuale è stata utilizzata una superficie trasparente agli infrarossi per determinare il punto di contatto necessario a fornire fisicità all'interazione dell'utente con l'interfaccia; soluzioni simili sono state adottate in applicazioni come Cristal Piano [11].

L'interazione con la matrice di sensori a ultrasuoni ha sollevato il problema di selezionare materiali trasparenti agli stessi, in grado di ricreare il feedback tattile; per questo motivo si è scelto di utilizzare una rete elastica con maglie di circa 2 millimetri posta ad una distanza di 33 millimetri dalla matrice sensori (Figura 2). Questa soluzione ha creato un interessante effetto somatosensoriale in quanto la resistenza della rete elastica cresce proporzionalmente alla pressione del dito sulla stessa.

In alternativa è stato chiesto ai pianisti di indossare dei guanti costruiti ponendo dei piccoli magneti scorrevoli sulle punte delle dita (Figura 4); è stata predisposta una parte



Figura 4. Guanti magnetici.

di tavolo con una serie di magneti polarizzati inversamente rispetto a quelli dei guanti nei punti corrispondenti ai tasti del pianoforte. La forza repulsiva risultante e la conseguente sensazione sono state valutate realistiche, ma il disagio manifestato dai pianisti nell'indossare dei guanti così costruiti ha portato a escludere questa soluzione applicativa.

Sono stati fatti dei tentativi di concentrare fasci di ultrasuoni utilizzando trasduttori ad alta potenza. I segnali sono stati sfasati temporalmente in modo da creare dei punti di fuoco posti a pochi centimetri dalla superficie del tavolo. Al momento non sono emersi risultati significativi, probabilmente a causa del ridotto numero di trasduttori impiegati.

4. RISULTATI

In Tabella 1 riportiamo una comparazione tra i sistemi di rilevamento, illustrandone le differenze in termini di prestazioni e costo computazionale.

La Leap Motion consente una rilevazione continua e molto precisa mentre la matrice di sensori a ultrasuoni prevede di utilizzare un sensore per ogni tasto. L'algoritmo attuale utilizzato dalla Leap Motion non permette un corretto impiego nel tracking verticale dei movimenti delle dita in quanto, molto frequentemente, la rilevazione viene

<i>Proprietà</i>	Leap Motion	Ultrasuoni
<i>Punti rilevati</i>	Rilevamento continuo	Un sensore per tasto
<i>Requisiti hardware</i>	Android e laptop	Android e Arduino ADK
<i>fps</i>	30~300	200
<i>Falsi positivi</i>	eccessivi	limitati
<i>Falsi negativi</i>	limitati	nessuno
<i>Latenza</i>	accettabile	molto ridotta
<i>Feedback tattile</i>	superficie rigida	continuo e proporzionale
<i>Tolleranza dei soggetti</i>	bassa (guanti)	buona (rete elastica)
<i>Integrazione diretta con Android</i>	non possibile al momento	utilizzando Arduino ADK (USB)

Tabella 1. Comparazione tra Leap Motion e matrice di sensori a ultrasuoni

interrotta a causa di movimenti rapidi della mano. Distanze inferiori ai 7 centimetri non sono rilevabili impedendo la costruzione di prototipi facilmente trasportabili. Il driver della Leap Motion è inoltre esoso in termini di CPU, e una sua integrazione nei dispositivi mobili sembra non banale. Per funzionare al meglio, l'applicazione richiede il posizionamento frontale del sistema di tracking; al momento questo non è possibile a causa dell'algoritmo utilizzato dal dispositivo. Data l'assenza di un'API che fornisca direttamente la nuvola di punti, sono stati fatti dei tentativi di accedere direttamente alle informazioni di basso livello provenienti dal dispositivo. L'assenza di specifiche del protocollo di comunicazione non permette un'ottimale gestione e, di conseguenza, la frequenza massima ottenibile è bassa (circa 15 fps). È stato implementato un algoritmo di riconoscimento che, partendo dalle immagini catturate (destra e sinistra), effettua il calcolo della matrice di disparità, la determinazione dei contorni della mano e dei difetti di convessità al fine di localizzare le estremità delle dita. I risultati di tale algoritmo consentono di costruire la scheletrizzazione della mano che risulta però affetta da un'instabilità dei punti dettata dalla bassa frequenza di cattura. Inoltre il costo computazionale di tale algoritmo al momento risulta comparabile a quello originale. Il produttore del dispositivo ha previsto a breve nuove implementazioni che consentano un rilevamento più stabile e una API estesa;

La rilevazione ad ultrasuoni è stata valutata come robusta e ripetibile. Infatti, i sensori pilotati dal microcontrollore consentono una rapida e accurata stima della distanza, successivamente convertita in eventi grazie ad un algoritmo dal costo computazionale limitato. L'uso della tecnologia a ultrasuoni permette di utilizzare materiali, come la rete elastica impiegata nel sistema, che risultano trasparenti al rilevamento ma permettono di generare una risposta somatosensoriale al tocco. Di contro non è possibile porre superfici estese in prossimità dei sensori per evitare riflessioni accidentali; per questo motivo è neces-

sario ruotare il dispositivo mobile sullo stand in modo che eventuali riflessioni non interessino l'area dei sensori.

Un test informale del sistema a ultrasuoni ha mostrato come, a seguito di un evento di pressione sulla rete elastica, la generazione in sequenza degli stimoli tattile, audio e video restituisca la sensazione di unità dell'azione anche se la visualizzazione risulta affetta da latenza.

5. CONCLUSIONI

Abbiamo realizzato un ambiente di test in realtà aumentata per dispositivi mobili nel quale sono state confrontate due differenti tecniche di rilevamento dei movimenti delle dita per la realizzazione di interfacce di pianoforte. Indagini preliminari hanno mostrato come sistemi basati su tastiere immateriali possano essere realizzati; rimangono però irrisolti molti problemi, soprattutto per quanto riguarda la latenza complessiva e la portabilità dei sistemi. La sfida maggiore sembra essere la generazione di un feedback tattile sufficientemente realistico. Allo scopo, verranno compiute ulteriori ricerche riguardanti i sistemi rilevamento nonché la ricerca di materiali e tecniche per migliorare le soluzioni di generazione del feedback tattile.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori segnalano il supporto del progetto PiaNo - *Piano from Nothing*, finanziato da Intel Corporation - Santa Clara (CA) e coordinato da Tsinghua University - Pechino (Rep. Pop. Cinese) nella persona del Prof. Linmi Tao.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] D. J. Levitin, K. Maclean, M. Mathews, L. Chu, and E. Jensen, "The perception of cross-modal simultaneity (or "the Greenwich Observatory Problem" revisited)," vol. 517, pp. 323-329, AIP, 2000.
- [2] N. Miner and T. Caudell, "Computational requirements and synchronization issues for virtual acoustic displays," *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol. 7, pp. 396-409, Aug. 1998.
- [3] T. Mki-patola and P. Hmlinen, "Latency tolerance for gesture controlled continuous sound instrument without tactile feedback," in *Proc. International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 1-5, 2004.
- [4] J. M. Silva, M. Orozco, J. Cha, A. E. Saddik, and E. M. Petriu, "Human perception of haptic-to-video and haptic-to-audio skew in multimedia applications," *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, vol. 9, pp. 9:1-9:16, May 2013.
- [5] "Leap motion air piano."
- [6] J. L. Crowley, F. Brard, and J. Coutaz, "Finger tracking as an input device for augmented reality," in *Workshop on Automatic Face and Gesture Recognition, Zurich, Switzerland*, pp. 195-200, 1995.
- [7] J. Letessier and F. Berard, "Visual tracking of bare fingers for interactive surfaces," in *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST 04)*, (Santa Fe, NM, USA), pp. 119-122, ACM Press, 2004.
- [8] A. Goodwin and R. D. Green, "Key detection for a virtual piano teacher," in *IVCNZ*, pp. 282-287, 2013.
- [9] F. Huang, Y. Zhou, Y. Yu, Z. Wang, and S. Du, "Piano ar: A markerless augmented reality based piano teaching system," in *2011 Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics* (U. IEEE Computer Society Washington, DC, ed.).
- [10] T. Kaaresoja and S. A. Brewster, "Feedback is... late: measuring multimodal delays in mobile device touchscreen interaction," in *ICMI-MLMI*, p. 2, 2010.
- [11] E. S. Silva, J. A. O. de Abreu, J. H. P. de Almeida, V. Teichrieb, and G. L. Ramalho, "A preliminary evaluation of the leap motion sensor as controller of new digital musical instruments," in *14th SBCM - Brazilian Symposium on Computer Music*, 2013.
- [12] M. Reunanen, K. T. Palovuori, T. Ilmonen, and W. Mkel, "Npr - affordable fingertip tracking with ultrasound," in *IPT/EGVE* (E. Kjems and R. Blach, eds.), pp. 51-58, Eurographics Association, 2005.
- [13] S. Perrin, A. Cassinelli, and M. Ishikawa, "Laser-based finger tracking system suitable for moems integration," in *Proc. IVCNZ03, New Zealand*, pp. 131-136, 2003.
- [14] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *EEE Trans. Haptics*, vol. 3, pp. 155-165, July 2010.
- [15] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces.," in *UIST* (S. Izadi, A. J. Quigley, I. Poupyrev, and T. Igarashi, eds.), pp. 505-514, ACM, 2013.
- [16] S. Gupta, D. Morris, S. N. Patel, and D. Tan, "Airwave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings," in *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13*, (New York, NY, USA), pp. 419-428, ACM, 2013.
- [17] K. Karunanayaka, S. Siriwardana, C. Edirisinghe, R. Nakatsu, and P. Gopalakrishnakone, "Haptic mouse, enabling near surface haptics in pointing interfaces," in *Proc. ACHI 2013 - Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, 2013.