



AUDIO PROCESSING

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA
A.A. 2021/22
Prof. Filippo L.M. Milotta

ID PROGETTO: 03

TITOLO PROGETTO: La forza del suono

AUTORE 1: Cannata Adriana Antonella

AUTORE 2: Basile Alessandro

AUTORE 3: Li Noce Arianna

Indice

1. Obiettivi del progetto	2
2. Riferimenti Bibliografici	3
3. Argomenti Teorici Trattati	10

1. Obiettivi del progetto

Tutti gli appassionati di fantascienza avranno sognato, almeno una volta nella loro vita, di poter spostare gli oggetti senza toccarli direttamente. E la scienza è riuscita a far divenire realtà questo piccolo sogno nel cassetto. Non si parla di telecinesi, né del potere della Forza di *Star Wars*, ma di qualcosa ugualmente affascinante: la levitazione di oggetti mediante onde sonore. Il suono permette infatti di spostare oggetti in aria, in acqua e anche attraverso i tessuti, fatto che ne rende molto utili e interessanti le applicazioni in campo medico e farmaceutico.

Da dove nasce tutto questo? Come si possono far levitare oggetti sfruttando unicamente la forza del suono? Partiamo da un concetto basilare: ogni oggetto, ogni persona, ogni essere vivente e non, può produrre un suono. Ognuno ha caratteristiche differenti, tratti che lo contraddistinguono da un altro: uno più acuto, uno più grave, uno con intensità più alta o più bassa. Tuttavia, hanno una caratteristica che li accomuna: sono delle onde che trasportano energia.

Questo concetto potrebbe essere difficile da comprendere, forse è meglio vederlo o sentirlo. Ma in realtà basta poco: immaginiamo la sensazione che proviamo quando ci mettiamo vicino ad una cassa acustica in funzione oppure durante un concerto. Possiamo percepire lo spostamento dell'aria sulla nostra pelle. Di primo impatto, uno può quindi pensare che a spostare un oggetto sia una massa d'aria, o una calamita che attrae un corpo metallico. Ma non è così, è più complesso ed affascinante di tutto questo. Il concetto di levitazione acustica è un fenomeno che è possibile manifestare sotto determinate condizioni, quali la frequenza e l'intensità del suono emesso, il corpo che si vuole far lievitare e l'ambiente circostante. Il concetto base, quindi, è che un suono alla giusta frequenza, con un'intensità adeguata, può muovere dei corpi solidi.

Vediamo allora come far levitare gli oggetti tramite onde sonore: inizieremo a esplorare i levitatori e il modo in cui sono costruiti; in seguito conosceremo gli ologrammi acustici, mezzo molto potente per la manipolazione di oggetti su superfici bi e tridimensionali, e infine ci addentreremo in una delle tante applicazioni di questo tipo di levitazione, ancora oggetto di studio.

2. Riferimenti Bibliografici

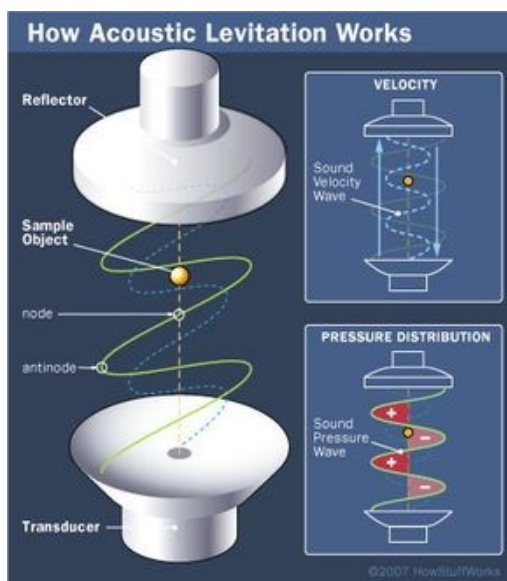
La levitazione acustica utilizza le proprietà fisiche del suono per “sospendere a mezz’aria” oggetti solidi, liquidi o gassosi.

L’energia trasportata da un’onda meccanica longitudinale viene utilizzata per bilanciare la forza di gravità. C’è la necessità di un mezzo per permettere la propagazione di questa, un fluido od un gas, e l’energia richiesta è maggiore in base alla forza di accelerazione gravitazionale alla quale il corpo è sottoposto.

Il suono che deve essere generato non sarà percettibile dall’orecchio umano in quanto ben al di sopra dei 22kHz (~40 kHz), quindi è necessario uno speaker apposito, per la precisione un trasduttore ad alta frequenza, di quelli utilizzati per i sensori di prossimità. Quest’onda rimbalzerà su una superficie riflettente posta a una distanza corretta, pari a un multiplo o sottomultiplo di metà della lunghezza d’onda, ad esempio 2 Lambda, 4 Lambda, $\frac{1}{2}$ Lambda, $\frac{1}{4}$ Lambda. La superficie e il trasduttore saranno più efficaci a indirizzare l’onda sonora qualora questi siano concavi.

È anche possibile utilizzare due trasduttori, operanti a frequenze simili, che si guardano l’un l’altro, per aumentare la capacità di sospensione della piccola sfera di prova. Questa solitamente è molto piccola, nell’ordine dei 2~3mm di diametro, con massa inferiore al grammo.

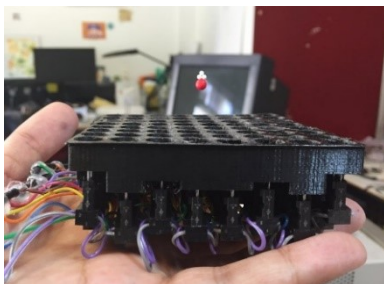
Quando il suono emesso e il suono riflesso/emesso dal secondo trasduttore si incontrano, se sono paralleli tra loro e sono posizionati alla distanza corretta, creeranno un’interferenza, generando un’onda statica. In quest’ultima ci saranno dei nodi ed anti nodi.



Il nodo è una zona a pressione minima dove è possibile far orbitare delle piccole masse. Possiamo definirli come punti di equilibrio stabile, ovvero dei punti dove le piccole sferette tenderanno a rimanere finché la perturbazione che viene fornita dall’esterno è inferiore all’intorno dell’equilibrio. In condizioni di microgravità, gli oggetti leviteranno nella zona del nodo, mentre in presenza di una forza di accelerazione gravitazionale maggiore, come qui sulla Terra, le sfere tenderanno a stare appena al di sotto del nodo.

L’anti nodo è il duale del nodo, una zona a pressione massima dove non è possibile far orbitare delle piccole masse. Possiamo definirli come punti di equilibrio instabile, ovvero dei punti dove le piccole sferette tenderanno a “scappare” verso un altro punto di equilibrio.

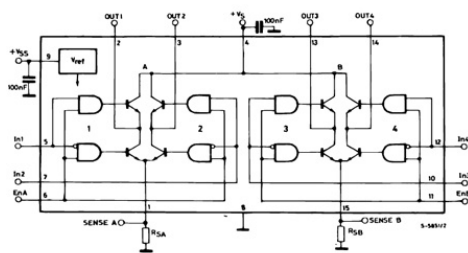
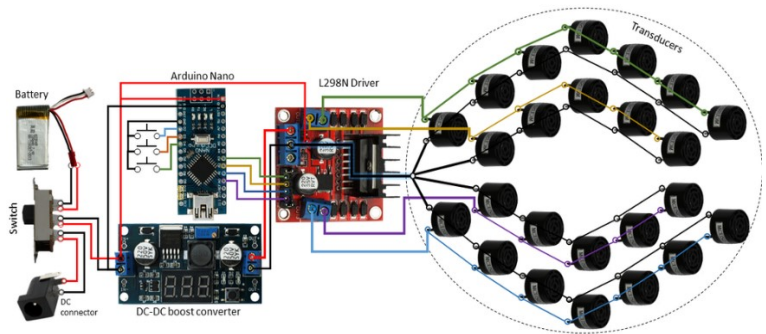
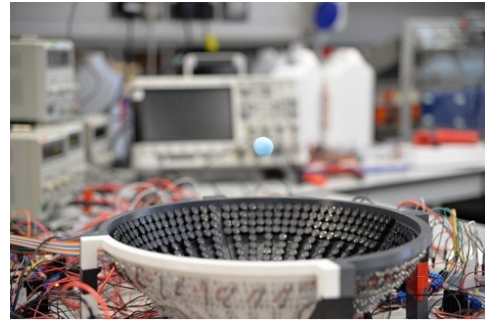
È anche possibile utilizzare dei trasduttori senza alcuna parete riflettente. Questi dovranno essere disposti in una griglia piana o su una superficie concava; nelle configurazioni a più trasduttori si utilizzeranno le stesse onde meccaniche per creare dei nodi di sospensione. Vediamo quali sono i pro e i contro di entrambe le configurazioni.



La prima – griglia piana – permette una maggiore libertà di movimento del corpo a discapito della corrente necessaria per farlo levitare. In questo modo è possibile creare diversi nodi e anti nodi variando la fase e l’ampiezza dell’onda emessa dal singolo trasduttore, permettendo di creare con più facilità un “gioco di movimenti” con le piccole sfere. La sua realizzazione dal punto di vista circuitale e computazionale risulta onerosa, in quanto ogni trasduttore dovrà essere controllato singolarmente. A discapito di questo, se creassimo un cubo, con almeno due facce occupate da un “muro” di trasduttori, sarebbe possibile avere un’ampia libertà di movimento nelle tre dimensioni.

La seconda – superficie concava – permette invece di concentrare le onde in un singolo punto, aumentando l'efficienza in termini di ampere richiesti per la massa da sollevare, ma riducendo la libertà di movimento. Questo è dovuto al fatto che molti trasduttori sono collegati in parallelo tra di loro, ergo “suoneranno” la stessa nota. Teoricamente si dovrebbe avere ancora libertà di movimento almeno in una dimensione, l'altezza, e forse nelle rimanenti due, larghezza e profondità.

In base a quanto riportato sopra, abbiamo deciso di provare a realizzare un mini prototipo di levitatore acustico secondo la seconda configurazione. Il circuito di controllo necessario per questo dispositivo è nettamente più semplice di quello a “griglia piana”, inoltre è meno oneroso a livello computazionale per un piccolo microcontrollore.



Il progetto prevede di utilizzare 30 trasduttori da 16mm controllati dal driver dual o full-bridge L298N (schematico riportato in figura), un Arduino pro mini per generare dei segnali ad onda quadra da inviare al driver, delle batterie 18650, un circuito di step-up per alimentare il driver alla tensione corretta e del materiale plastico per costruire la struttura tramite una stampante 3D (PLA o PETG). Il circuito di controllo finale sarà simile a quello riportato

nell'immagine, con l'unica differenza riguardante il pacco batteria che sarà una serie di 2~3 batterie 18650 e l'aggiunta di un BMS con ricarica delle batterie.

Il codice di controllo è scritto in Arduino C++, che è essenzialmente C++ spogliato di alcune librerie e personalizzato per essere eseguito su una MCU con risorse limitate.

Ci teniamo a riportare il [sito](#) (non listato nei riferimenti bibliografici) da cui abbiamo preso ispirazione per la realizzazione del dispositivo.

Torniamo adesso alla nostra trattazione e cerchiamo di capire come funzionano gli ologrammi acustici, importante mezzo per far levitare gli oggetti. Le applicazioni sono innumerevoli: si va dall'ambito farmaceutico e/o chirurgico, con il “trasporto senza contenitore”, alla manipolazione di cellule, dalla cristallografia fino alla levitazione di esseri viventi. Tramite le onde sonore, infatti, si potrebbe guidare un farmaco esattamente nel punto da trattare, evitandone la dispersione in altri punti del corpo e quindi anche gli effetti collaterali che produrrebbe, ma anche per spostare materiali pericolosi per la salute se direttamente a contatto con esseri umani o per evitare la contaminazione degli stessi se a contatto con umani o macchine.

Da dove vengono gli ologrammi acustici? Facciamo un passo indietro: nel 2015, i ricercatori delle Università di Bristol e di Navarra in Pamplona hanno costruito dei levitatori con l'uso di array di speaker. Gli speaker producono onde ultrasoniche con diverse pressioni, che sono controllate attivamente per formare veri e propri ologrammi in 3D capaci di spostare oggetti microscopici. Affascinante: pur non essendo in grado di sentire il suono di queste onde, riusciamo a vederne gli effetti!

Una volta scoperto, nel 1986, che particelle dielettriche, così come virus e batteri possono essere intrappolati da laser, la scienza ha fatto passi da gigante con l'introduzione di ologrammi ottici: in particolare, le pinzette

ottiche sono risultate efficaci per la manipolazione simultanea di particelle multiple. Ciò ha portato, per esempio, ad applicazioni come l'assemblaggio di strutture colloidali, quasicristalli o nanofili.

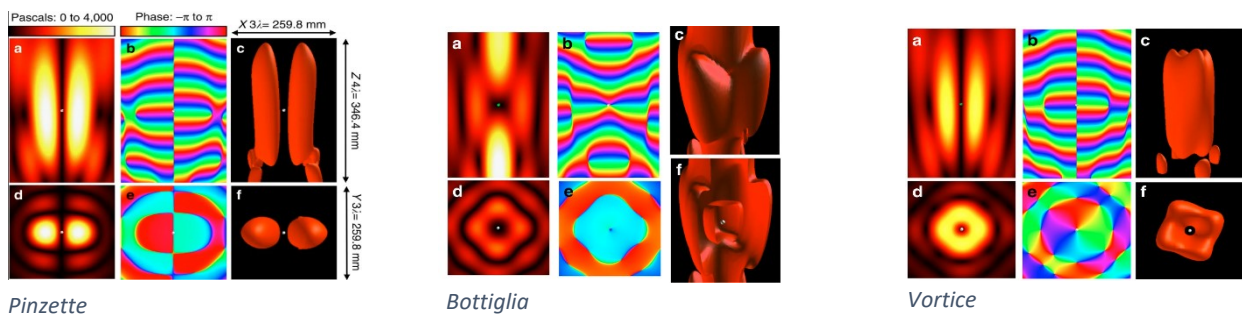
Allora perché usare ologrammi acustici, se quelli ottici sono già collaudati da circa vent'anni?

La differenza sta nelle forze di radiazione acustiche, che sono più potenti della controparte ottica di cinque ordini di grandezza. Questo si traduce in operazioni che richiedono una potenza minore, fondamentale nelle applicazioni di manipolazione delle cellule. Oltre alle applicazioni *in vivo*, gli ologrammi acustici risultano efficaci nell'imaging diagnostico, le cui applicazioni sono ancora oggetto di studio. Queste applicazioni sono realizzabili solo se è possibile manipolare in modo indipendente le particelle di strutture complesse: in questo le pinzette acustiche risultano ottimali per la loro versatilità e rendono possibile anche la rappresentazione fisica di strutture 3D.

In sostanza, gli ologrammi acustici racchiudono in sé i vantaggi provenienti dalle classiche pinzette ottiche: intrappolamento delle particelle in un singolo fascio, la possibilità di ruotare le particelle, il controllo olografico su particelle multiple. Questi vantaggi vanno però a fondersi con quelli propri della levitazione acustica, soprattutto in termini di efficienza e versatilità: ciò porta all'implementazione di fasci traenti particolarmente potenti, come anche a rappresentazioni di strutture 3D realizzabili anche con ologrammi ottici, ma su scale di lunghezza molto più piccole.

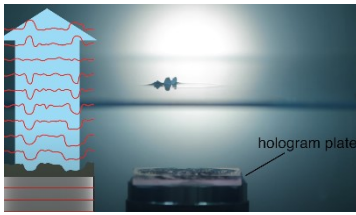
Le pinzette sono realizzate soprattutto grazie all'utilizzo di risuonatori piezoelettrici, che consentono di creare ologrammi con pattern ben precisi. Insieme alle pinzette, altri due tipi di pattern ottimali sono i vortici e le bottiglie. Sì, detto così sembra non avere un senso; cerchiamo di spiegarci meglio!

Nelle tre figure sottostanti abbiamo l'ampiezza in (a) e in (d), la fase in (b) ed (e) e l'isosuperficie dell'ampiezza di 2kPa. Senza addentrarci troppo nella spiegazione di come questi pattern vengono fuori, consideriamo l'immagine delle pinzette, la più intuitiva: possiamo chiaramente vedere due regioni cilindriche di ampiezza elevata, in giallo nelle figure (a) e (d) e poi ricostruite in (c) e (f), che rimandano esattamente alla figura di una pinzetta. In maniera simile, si possono ottenere il pattern a vortice e quello a bottiglia.



Questi tre tipi di ologrammi, che possiamo anche chiamare “trappole acustiche” derivano dalla loro controparte ottica e vengono generati grazie alla modulazione della fase dei trasduttori. Facendo convergere tutte le onde in fase verso un unico punto focale, si genera una lente acustica. A sua volta, la lente fa convergere le onde verso un altro punto focale prossimo alla posizione della trappola acustica. Le onde qui pervenute si combinano poi con un secondo elemento olografico, che varia in base al tipo di trappola. Possiamo quindi dire che la modulazione di fase a livello dei trasduttori si comporta come una piastra per ologrammi. Se a questa piastra sottraiamo infine la lente, otteniamo la *signature* dell'ologramma, che è proprio ciò che possiamo mettere in relazione ai più intuitivi pattern usati nel campo ottico.

Ma visto che i trasduttori si comportano come una piastra per ologrammi, perché non usarne direttamente una al posto degli speaker? Le ricerche del Max Planck Institute di Stoccarda hanno effettivamente dimostrato che una piastra per ologrammi realizzata tramite stampante 3D è equivalente all'utilizzo di 20.000 speaker. Ciò si traduce in una facilitata produzione di ologrammi dalle strutture complesse con l'uso di un'unica sorgente sonora.



La sorgente sonora è stata piazzata sott'acqua, con la piastra esattamente sullo speaker. I diversi tipi di onde da generate dallo speaker saranno soggette a diffrazione nell'attraversamento della piastra, che non presenta lo stesso spessore su tutta la sua superficie. Queste differenze di spessore, infatti, introducono un modello di distorsione che rimane per tutto il percorso, fino alla superficie dell'acqua, andando a influenzare il movimento dei corpi da controllare, che nel caso dell'esperimento in questione è una barchetta di carta.

Come detto prima, più corpi possono essere contemporaneamente manipolati per la creazione di strutture complesse, come per esempio una colomba ottenuta su una superficie bidimensionale tramite la levitazione di palline di polistirolo. Con le piastre per ologrammi è più semplice ottenere questo tipo di strutture, rispetto agli speaker: al computer si inserisce il disegno da ottenere e l'intelligenza artificiale genera la struttura della piastra per ologrammi che dovrà essere utilizzata. Tramite la stampa 3D, la struttura digitale viene perciò trasformata nella piastra fisica, che introdurrà infine il modello di distorsione necessario alla manipolazione di particelle fino a ottenere la struttura, bi o tridimensionale, che si intendeva ricreare sin dall'inizio.

Abbiamo visto quindi come funziona la levitazione acustica e quali sono i vantaggi degli ologrammi acustici: è arrivato il momento di capire che cosa succede realmente con la manipolazione acustica non invasiva di un oggetto in un corpo vivente.

Questa tecnica si basa sull'utilizzo di un raggio orientabile da una fonte per sollevare e riposizionare in sicurezza una "pietra" presente in esso. È utilizzata ad esempio per espellere calcoli renali o manipolare una macchina fotografica ingeribile, fornendo una struttura per altre applicazioni mediche, nonché per usi non medici che richiedono il movimento non invasivo di oggetti densi e di grandi dimensioni in un campo libero o all'interno di un contenitore.

In alcune applicazioni mediche, sarebbe utile trasmettere un raggio di ultrasuoni attraverso la pelle per manipolare un oggetto solido all'interno del corpo umano. In particolare, fasci di ultrasuoni di forme specifiche sono stati progettati mediante modellazione numerica e prodotti utilizzando un phased array. È stato dimostrato che questi fasci levitano e guidano elettronicamente oggetti solidi – sfere di vetro di 3 mm di diametro – lungo percorsi pre programmati, sia in un bagno d'acqua che nelle vesciche urinarie di maiali vivi. La deviazione dal percorso previsto è stata in media $<10\%$ e nessuna lesione è stata trovata sulla parete della vescica o sul tessuto interposto.

Ogni anno solo negli Stati Uniti vengono eseguiti oltre 50 milioni di interventi chirurgici ospedalieri. Tali procedure comportano rischi intrinseci di sanguinamento, infezione, dolore postoperatorio, cicatrici e complicanze dell'anestesia, complicanze chirurgiche si verificano in circa un paziente su sei. La chirurgia non invasiva è un'area emergente della medicina che sta rapidamente sostituendo le procedure aperte e può ridurre al minimo i rischi associati a incisioni, forature o inserimento di strumenti nel corpo.

Tali tecnologie potrebbero portare a un metodo per promuovere in modo non invasivo la rimozione di calcoli e frammenti urinari, considerando che i soli calcoli urinari colpiscono circa il 10% della popolazione durante la loro vita e la prevalenza è in aumento. È probabile che i calcoli di 5 mm o più piccoli nella loro dimensione maggiore passino spontaneamente attraverso il tratto urinario, ma i calcoli più grandi devono essere prima frammentati mediante tecniche endoscopiche o litotrissia a onde d'urto. Tuttavia, i frammenti spesso rimangono e fungono da nidi per la crescita di calcoli futuri e i sintomi si ripresentano entro 5 anni nel 50% dei casi di calcoli residui. È stato dimostrato che la propulsione a ultrasuoni riposiziona in modo non invasivo i calcoli negli studi clinici sull'uomo ed è attualmente studiata per espellere piccoli calcoli o frammenti residui dal rene in modo che passino naturalmente e possibilmente in modo asintomatico. Una delle principali limitazioni della tecnologia attuale è che la forza può essere diretta solo lontano dal trasduttore. Non sono stati realizzati metodi per spostare il calcolo trasversalmente al raggio acustico o per guidare il calcolo attraverso il complesso percorso tridimensionale nel tratto urinario. Ad esempio, lo spostamento di piccoli

calcoli dall'uretere alla vescica richiede un movimento trasversale perché l'uretere giace parallelo alla superficie della pelle.

Per la manipolazione non invasiva si usa una tecnologia emergente nota come intrappolamento acustico; questo si verifica quando la forza di radiazione di un campo d'onda agisce per impedire a un oggetto di spostarsi da una posizione stabile nel raggio. Le onde acustiche possono penetrare attraverso molti materiali che la luce non può e, come già detto prima, le forze di radiazione generate da un raggio acustico possono essere molto più forti di quelle associate a un'onda elettromagnetica. La forza di radiazione è il risultato del trasferimento di quantità di moto causato dalla diffusione dell'onda da un oggetto posto nel campo d'onda. La dispersione da un oggetto dipende dalla lunghezza d'onda e dalla distribuzione spaziale del campo d'onda, dalle proprietà del fluido e dalle dimensioni e dalla composizione dell'oggetto. Nel caso di un oggetto più piccolo della lunghezza d'onda, lo scattering è una piccola perturbazione del raggio incidente costituito dai due termini di ordine più alto, che semplifica il problema matematicamente e fisicamente. Per oggetti più grandi, le forze di radiazione sono più difficili da prevedere, ma possono essere calcolate integrando l'intero campo diffuso sulla superficie dell'oggetto. Nel caso di un'onda stazionaria, piccoli oggetti possono essere intrappolati a pressioni minime o massime a seconda della densità dell'oggetto e della compressibilità rispetto al fluido circostante. L'oggetto può quindi essere manipolato spostando la sorgente o cambiando la frequenza per regolare la posizione dell'estremo di pressione in cui è tenuto l'oggetto.

Sebbene la forza di radiazione dipenda da molti fattori, una regione di bassa intensità circondata da una regione di alta intensità definisce un pozzo di intensità che può fornire un metodo per intrappolare e guidare un oggetto. Per creare un pozzo di tale intensità, si usano comunemente i fasci di vortice (vecchi amici!). Per creare il vortice, la fase dell'onda emessa viene fatta variare fino a generare un fronte d'onda elicoidale. In questo caso la fase deve aumentare linearmente con l'angolo circonferenziale e l'elicità deve avere un passo tale da essere continua intorno alla circonferenza. Il risultato è un'interferenza distruttiva dell'onda in asse, ma un'interferenza costruttiva fuori asse, risultante in un anello di intensità nel piano trasversale all'asse del fascio. Se l'anello viene posizionato attorno a un oggetto e spostato trasversalmente, la forza dell'anello di maggiore intensità su un lato dell'oggetto generalmente lo "spingerà" indietro verso il centro dell'anello. Un oggetto può quindi essere riposizionato spostando manualmente il trasduttore acustico, oppure utilizzando un array di trasduttori e dirigendo elettronicamente il raggio alterando la fase dell'onda emessa da ciascun elemento.

Per tale applicazione, è preferibile utilizzare un'unica fonte per intrappolare e spostare un oggetto in 3D. L'approccio del raggio di vortice può essere esteso anche per controllare l'oggetto lungo l'asse. Il raggio può quindi essere guidato elettronicamente per spostare l'oggetto.

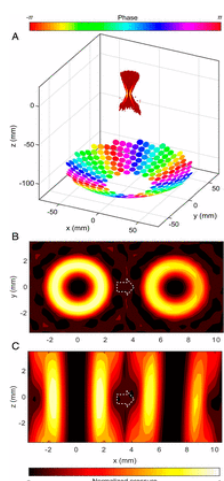
L'obiettivo del lavoro qui presentato era di manipolare per via transcutanea un oggetto all'interno di un corpo animale vivente utilizzando il raggio di un singolo trasduttore. È stato sviluppato un sistema e metodi per produrre la manipolazione 3D di un oggetto di dimensioni millimetriche scelto per imitare un calcolo renale. Si dimostra con successo sia in un bagno d'acqua che in maiali vivi, la capacità di eseguire movimenti complessi per spostare a distanza un oggetto lungo un percorso interamente controllato dal campo acustico sotto guida di immagini ad ultrasuoni. L'analisi del tessuto esposto durante la manipolazione ha confermato la sicurezza di tale procedura.

Risultati

Sintesi del raggio

Un array focalizzato di 256 elementi con un'apertura di 15 cm e una distanza focale di 12 cm è stato utilizzato a 1,5 MHz per sintetizzare i fasci di vortice. La figura sottostante mostra l'array e la struttura a clessidra cava di un fascio di vortice utilizzato per l'intrappolamento acustico. Il fascio viene creato alterando la fase tra gli elementi mentre la loro ampiezza rimane costante. Il ritardo di fase imposto da elemento a elemento

aumenta in proporzione con l'angolo circonferenziale attorno alla matrice da zero a $2\pi M$, dove M è un numero intero noto come carica topologica. $M = 0$ implica che l'intera superficie del trasduttore oscilli in fase,



il che produce un raggio focalizzato sfericamente, risultando in un picco anziché in un asse nullo al fuoco. Altrimenti, la grandezza di M controlla il diametro dell'anello di vortice di intensità o pressione acustica (Fig. 1B), mentre il segno di M cambia l'elicità del fronte d'onda in senso orario o antiorario. In questo articolo, per etichettare le travi applicate, usiamo una nomenclatura di M seguita dalla carica topologica con il diametro della trave tra parentesi. Ad esempio, M_4 (3,4 mm) denota una carica topologica di impulsi alternati di $M = 4$ e -4 per impedire all'oggetto di ruotare con la fase del fronte d'onda poiché la rotazione può far uscire l'oggetto dalla trappola e un diametro del fascio di 3,4 mm misurato da picco a picco attraverso il diametro della distribuzione dell'intensità dell'anello.

In figura vediamo un diagramma della fasatura dell'elemento e del campo di pressione focale simulato di un raggio di vortice con carica topologica $M = 4$ (A) e sezioni trasversali

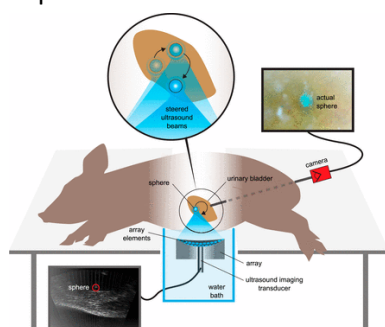
(B) e assiali (C) del campo di pressione simulato senza messa a fuoco e orientata elettronicamente 7 mm orizzontalmente fuori dall'asse. Lo sterzo a destra è indicato dalle frecce bianche. La distribuzione dell'ampiezza della pressione è simmetrica quando il raggio è focalizzato sull'asse della matrice, ma è asimmetrica quando focalizzato fuori dall'asse.

Manipolazione in vitro

È stata sviluppata una tecnica specifica per intrappolare la sfera e quindi manipolare la sfera in vitro, che è stata poi utilizzata anche in vivo. La sfera è stata mirata in asse a circa 2-3 mm distante dal fuoco acustico dell'array. Per spingere l'oggetto nell'esatto allineamento assiale finale, è stato inizialmente trasmesso un vortice largo M_{40} (7,8 mm) seguito da cariche topologiche discendenti fino a raggiungere M_4 (3,4 mm). Ciò è stato fatto a bassa potenza poiché iniziare con un raggio più stretto o un livello di potenza più elevato potrebbe comportare l'espulsione della sfera. Una volta intrappolata, la sfera è stata fatta levitare aumentando la potenza al livello previsto e l'esatta posizione verticale era nota dall'immagine ad ultrasuoni. Se non è stata osservata alcuna levitazione, l'array è stato sollevato meccanicamente utilizzando un movimento fine ottenuto da un motore passo-passo. In caso di esito negativo, l'array veniva abbassato meccanicamente e il processo veniva ripetuto a una potenza leggermente superiore. Quando invece la procedura è stata avviata con la sfera situata in posizione prefocale, la sfera è stata accelerata attraverso il fuoco, dove la forza di radiazione verticale è maggiore, ed espulsa dalla trappola. Una volta intrappolata, la sfera è stata spostata in qualsiasi direzione elettronicamente o spostando l'array.

Manipolazione in vivo

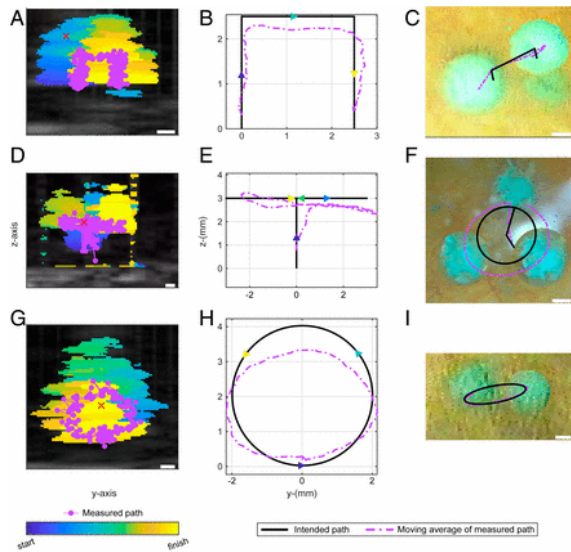
Una sfera di vetro di 3 mm è stata manipolata lungo tre percorsi preprogrammati nelle vesciche urinarie di tre suini vivi sottoposti ad anestesia generale. È stato utilizzato il fascio di vortice M_4 (3,4 mm) a circa 10 W di potenza. La finestra acustica era attraverso l'addome con il maiale in posizione supina laterale.



L'array e la sonda di imaging a ultrasuoni montata al centro sono stati immersi in un serbatoio d'acqua con il lato della sezione mediana del maiale sotto il livello dell'acqua per l'accoppiamento acustico. La sfera di vetro è stata dipinta di blu per facilitare l'osservazione da parte della telecamera nella vescica. Lo scanner a ultrasuoni è stato sincronizzato con gli impulsi di manipolazione per l'imaging in tempo reale a 15 Hz.

Le sfere sono state spostate con successo in tre percorsi separati in vivo. Le escursioni verticali e orizzontali massime previste dei tre percorsi erano

rispettivamente di 3, 3 e 4 mm e 3, 6 e 4 mm. Lo spessore della parete corporea attraversata dal fascio è stato misurato dalle immagini ad ultrasuoni per essere compreso tra 18 e 31 mm.



Vediamo nella figura a sinistra i tre diversi percorsi.

La sfera è stata fatta levitare lungo l'asse acustico, spostata lateralmente e abbassata nel percorso 1 (A-C). Nel percorso 2 (D-F), la sfera è stata levitata, quindi spostata in un percorso circolare in un piano trasversale dove si è mossa dentro e fuori dal piano di imaging ad ultrasuoni come rilevato dal cambiamento nell'intensità dell'immagine. Il percorso 3 (G-I) era un cerchio verticale nel piano focale yz. Le immagini a ultrasuoni sovrapposte sono codificate a colori per mostrare il movimento della sfera; le mappe di posizione per l'ecografia sono al centro e le immagini della telecamera sovrapposte sono sulla destra. Ogni immagine mostra la proiezione 2D del percorso previsto.

Dopo l'esposizione agli ultrasuoni, ogni suino è stato valutato per il danno tissutale per valutare la sicurezza della manipolazione acustica in vivo. Nessuna lesione grave è stata osservata alla parete della vescica in nessuno dei filmati registrati dalla telecamera. Dopo l'autopsia, non è stata osservata alcuna lesione grave nelle regioni mirate a seguito dell'esposizione agli ultrasuoni.

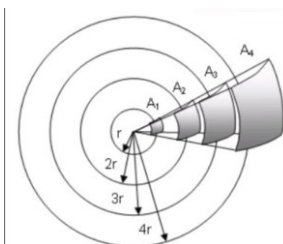
3. Argomenti Teorici Trattati

In acustica come anche in ottica, la frequenza f è una grandezza che esprime il numero di cicli al secondo di un'onda e si misura in Hertz [Hz]. È direttamente collegata al periodo, del quale è l'inverso ($f = 1/T$), alla lunghezza d'onda, con la quale ha una relazione di proporzionalità inversa e all'energia, con la quale è invece direttamente proporzionale. In un certo senso è anche collegata all'intensità di un suono, o meglio all'intensità percepita: svincolandoci dall'acustica ed entrando nell'ambito della psicoacustica, infatti, notiamo che le frequenze più alte hanno bisogno di meno energia per essere chiaramente sentite dall'orecchio umano, mentre basse frequenze con la stessa intensità vengono percepite molto più deboli. Questo ha ovviamente delle conseguenze importanti anche nell'ambito della produzione musicale ed è per esempio uno dei motivi per cui, per un buon mix, settare le intensità di tutti gli strumenti a partire dal basso è sempre una buona abitudine. Di contro, nell'orecchio umano le alte frequenze, sebbene percepite con più facilità, godono di una risoluzione in frequenza minore rispetto a quelle più basse. Ciò significa quindi che è più semplice discernere frequenze diverse se queste sono più basse. Un altro modo in cui la frequenza si lega all'intensità del suono è di nuovo in campo acustico e riguarda gli spettri di suoni complessi: la frequenza con la maggiore intensità è quella fondamentale che definisce la nota suonata o ascoltata. Quindi, quando in natura parliamo ad esempio di un La a 441 Hz, non ci stiamo riferendo a quella singola frequenza (altrimenti sarebbe un suono semplice, generabile soltanto al computer), ma a uno spettro costituito da più frequenze tra le quali "spicca" la fondamentale, mentre le altre, chiamate armoniche e di frequenza sempre superiore alla fondamentale, ma di intensità minore, contribuiscono al timbro del suono in questione. Se più frequenze potrebbero essere la fondamentale, e cioè se più frequenze hanno intensità simile, si parla di frequenza fantasma: questo è un tipico esempio di ciò che potrebbe accadere al segnale se vi è stato introdotto rumore. Per la levitazione di oggetti si usano infrasuoni o ultrasuoni; si tratta di frequenze che si trovano rispettivamente al di sotto della più bassa o al di sopra della più alta frequenza udibile dall'orecchio umano. Questa scala va tipicamente dai 20 ai 20.000 Hz, anche se è variabile da soggetto a soggetto e anche nell'ambito dello stesso soggetto, in base all'età. Infatti, i bambini riescono più facilmente a sentire le frequenze intorno ai 20.000 Hz, capacità che invece gli anziani perdono. Altri animali come le balene sono sensibili agli infrasuoni, altri come i delfini e i pipistrelli invece usano gli ultrasuoni per comunicare. L'orecchio umano però gode di una particolare caratteristica che non condivide con altri animali, e che quindi risulta particolarmente interessante sebbene la sua scala di udibilità delle frequenze non sia ampia come quella di altri mammiferi. Parliamo del comportamento tonotopico dell'orecchio, e cioè della capacità di riuscire a discernere più frequenze contemporaneamente. Questo succede perché i recettori del suono all'interno dell'orecchio, le ciglia, non si attivano tutti contemporaneamente se stimolati, ma sono idealmente suddivisi in bande, ognuna delle quali risponde a un determinato range di frequenze.

Legata alla frequenza, come detto prima, è la lunghezza d'onda (denominata Lambda λ), definita come la distanza tra due punti di massimo di un segnale periodico. Oltre che alla frequenza, questa grandezza è legata anche alla velocità di propagazione dell'onda ed è pari al rapporto tra le due ($\lambda = \frac{v}{f}$).

Nella trattazione della levitazione acustica abbiamo visto che anche l'ampiezza gioca un ruolo fondamentale, in particolare nella generazione di ologrammi acustici. L'ampiezza di un'onda è correlata all'intensità del suono, che a sua volta è influenzata dalla propagazione in un mezzo. In particolare, l'intensità diminuisce man mano che l'onda si propaga, cioè man mano che si allontana dalla sorgente. Questo fenomeno è spiegato dalla legge dell'inverso del quadrato: "La potenza del suono per unità di area (intensità sonora) diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio (distanza)".

Poiché il suono si propaga in maniera uniforme in tutte le direzioni e quindi in forma sferica rispetto alla sorgente, consideriamo la superficie della sfera, pari a $4\pi r^2$: l'intensità diminuirà in maniera proporzionale all'aumentare del quadrato della distanza dalla sorgente.



Consideriamo le circonferenze concentriche in figura: la stessa potenza sonora passa attraverso A1, A2, A3 e A4, ma le aree aumentano proporzionalmente al quadrato del raggio.

Questo spiega perché l'intensità sonora, cioè potenza sonora per unità di area diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio, e cioè è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.

Indicando con A l'area e con W la potenza sonora, $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$, e sapendo che l'intensità sonora vale $I = W/A$, si ottiene allora che $I = W/4 \cdot \pi \cdot r^2$. Ciò esprime l'andamento inversamente proporzionale dell'intensità sonora rispetto al quadrato del raggio.

Tale legge presenta però delle limitazioni, infatti si applica solo a sorgenti puntiformi, perché negli altri casi è approssimata; inoltre non è l'unica spiegazione sul decadimento del suono, che tende a decadere anche per il coefficiente di assorbimento dell'aria e dei materiali riflettenti, e cioè per la loro capacità variabile di assorbirlo.

Oltre al decadimento della sua intensità, durante la propagazione il suono può andare incontro a tre particolari fenomeni che lo alterano. Uno di questi è sfruttato nell'implementazione di ologrammi acustici tramite piastra per ologrammi sovrapposta a un'unica sorgente sonora: stiamo parlando della diffrazione. Questo fenomeno si verifica quando un'onda cerca di attraversare una fessura di una superficie più piccola della lunghezza d'onda di almeno un ordine di grandezza.

Le altre due alterazioni sono la rifrazione e la riflessione.

Parliamo di rifrazione quando un'onda viene deviata rispetto alla sua direzione originale. Ciò può essere causato da una variazione della velocità di propagazione, ergo un cambio di temperatura o un cambio del mezzo di propagazione. Possiamo considerare l'esempio della matita in un bicchiere d'acqua. Dall'esterno possiamo osservare che l'oggetto è leggermente distorto, come se fosse spezzato, e quello che noi vediamo è una deviazione della luce riflessa dalla matita.



Un'onda può essere deviata, ad esempio, dal vento stesso. L'aria calda tende a salire, l'aria fredda a scendere: se mettessimo a sistema queste due, considerata la direzione dell'aria ortogonale a quella del suono, e con versi ortogonali tra loro, otteniamo una nuova direzione e un nuovo verso per il suono. Questo ragionamento continuerebbe a valere anche se la direzione del vento fosse concorde.

In particolare, a causa del vento la velocità di propagazione aumenterebbe nel caso di vento concorde, diminuirebbe nel caso contrario.

Si parla invece di riflessione quando il suono incontra una superficie che non può attraversare; l'onda quindi viene deviata, perdendo parte della sua energia. Basti pensare a uno specchio che riflette la luce che lo colpisce. Il suono si comporta alla stessa maniera, con l'unica condizione che la superficie che deve colpire deve essere più piccola della lunghezza d'onda di circa un ordine di grandezza. Questo fenomeno è particolarmente utile per calcolare la distanza di un oggetto utilizzando le onde sonore. Utilizzando un suono a 40 kHz, possiamo ottenere la distanza di un oggetto cronometrando il tempo che questo impiega per tornare indietro ($distanza = \frac{velocità \times \Delta t}{2}$). Un altro fenomeno di riflessione è l'eco. Questo si manifesta quando la distanza tra la sorgente del suono e la superficie riflettente è maggiore della lunghezza d'onda; inoltre il suono non incontra ostacoli che potrebbero rifrangerla durante il tragitto, altrimenti si potrebbero incontrare delle distorsioni in frequenza o alterazioni nella velocità di propagazione.