

分割磁界供給型骨伝導による常時装着音響デバイス

暦本純^{1,2,a)}

概要：常時装着可能な音声インタフェースは人間と常にコンピュータと接続し能力を拡張させるための手段として有効である。従来のイヤホンや骨伝導型音響装置は常時装着性に課題があった。本研究では、頭皮に接着可能な小型磁石と、着脱可能なコイル部からなる分離型構成により、ヘッドセット等を要せずに装着可能な音声デバイスを提案する。提案構成により、通常の聴覚以外にもコンピュータ接続可能な聴覚を人間に与えることができる。聴覚検査により、本機構が通常のカナル型イヤホンと同等の性能をもつこと、さらに低周波領域においては振動を皮膚で感じることに由来する知覚も可能であることを確認した。

A Decoupled Electromagnetic Bone-Conduction Device for Always Available Auditory Interface

JUN REKIMOTO^{1,2,a)}

Abstract: An auditory interface capable of always being available is an effective means of continuously connecting a person to computing resources and thus expanding the person's capabilities. Conventional devices are not designed for achieving such connection. Earphones block the ear, and bone-conduction-type acoustic devices must be in close contact with the skull skin, and a headband is normally used to achieve this, making the device noticeable and not comfortable for long-term use. We have developed a device that eliminates the need for a headband and less-noticeable. It consists of a small magnet that is attached to the scalp and a separate coil. With this configuration, the proposed device provides a user computer-connectable hearing in addition to normal hearing. A user study demonstrated that this device has the same performance as a canal-type earphone and that perception in the low-frequency region is conveyed by vibration on the skin.

1. はじめに

インタラクションの手段として、音声インタフェースの重要性や実用性が増している。音声認識の精度があがったため、スマートスピーカなどの情報機器の操作手段、検索やテキスト入力などへの利用が広がっている。

情報を受け取る手段としての音声インタフェースも可能性が大きい。本論文ではとくに「常時装着可能な音声インタフェース」に着目する。ウェアラブルコンピュータの一種としての音声インタフェースは、眼鏡型の装置と比較

しても装着が目立たず、社会的に受け入れられる可能性が高い。音声インタフェースは言語情報のみならず、音声フィードバックによるスポーツトレーニング（サイバネティックトレーニング）のような非言語音声フィードバックの手段としても有効である [19]。本論文では、常時装着し、常にコンピュータからの情報を受け取れるメディアを「ヒューマンサブチャンネル」と呼ぶことにする。ウェアラブルコンピュータの本質が“always on”だとすると、インタフェースのサブチャンネル化は重要な特質であり、聴覚の利用は実用的である。^{*1}

しかし、サブチャンネルとしての聴覚デバイスを考えると、現状のイヤホンやヘッドセットは耳介を塞いでしまうので、本来の聴覚を阻害してしまう可能性がある。イヤホンに装着したマイクからの音声をイヤホンを経由して聞

¹ 東京大学
The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

² ソニーコンピュータサイエンス研究所
Sony Computer Science Laboratories
3-14-13 Higashigotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0022, Japan

a) rekimoto@acm.org

^{*1} このようなサブチャンネルとなった音声インタフェースをヒアラブル (hearables) と呼ぶこともある。

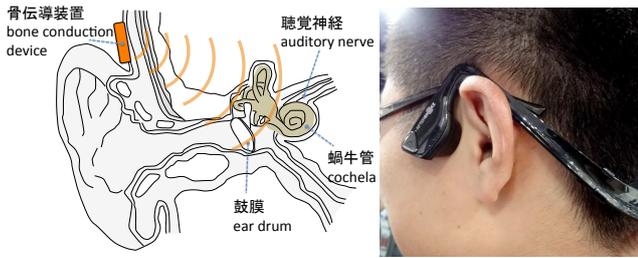


図 1 骨伝導装置: (左) 振動子が頭蓋骨に与える振動が鼓膜を経由せずに内耳(蝸牛管)を刺激し聴覚として知覚される。(右) 骨伝導装置の例。振動子を皮膚に密着させるためのヘッドバンドを要する。

くことも考えられるが、物理的に耳孔を長時間塞ぐことによる蒸れなどの問題が残る。肩に載せて使うスピーカーもあるが、音声が外部に漏れる、装着性に難があるなどの問題があり、常時装着には必ずしも向いていない。

そこで骨伝導音声 [4] に着目する。骨伝導音声デバイスは、鼓膜を経由せずに頭蓋骨を振動させ、内耳(蝸牛管)に音を伝達する(図 1)。スポーツ用途など耳を塞ぎたくない応用や、外耳や中耳の損傷により耳が聞こえない場合の補助機具として利用されている。

通常の骨伝導デバイスは、振動子をこめかみなど頭部皮膚に接触させ、頭蓋骨を震動させる。この構造のため、振動子を一定の圧力で皮膚に当て続ける必要があり、圧迫感を感じるなど、長期間の使用が快適ではない。また、左右から圧力を与え保持するヘッドセット型の構造が一般的(図 1 右)で、外観もイヤホン型よりも目立ってしまうという問題がある。

この問題を解決するために、頭蓋骨にチタンのボルトを埋設し、そのボルトと外部の骨伝導ユニットを結合して震動を伝達する BAHA (Bone Anchored Hearing Aids) [6] という骨伝導技術が存在する。しかし、外科手術を要するので用途は聴覚障害治療用に限定され、費用も高額となる。現状では一般の利用者が容易に利用できるものではない。さらに、金属部品を頭部に永久的に埋設した場合、MRI などの医療機器の利用が難しくなるなどの課題もある。

2. 分割型磁界供給方式による骨伝導装置

これらの問題を解決し、常時装着聴覚伝達装置を構成するために、本研究では分離型磁界供給機構を提案する。

提案方式の構成を図 2 に示す。図の上が従来方式の骨伝導音声装置で、装置そのものが震動し、その震動を接触面によって頭蓋骨に伝達する。そのため、良好な音響伝達のためには装置を頭部表面に密着させる必要があり、装置そのものからの音漏れも発生する。図 2 の下が提案方式で、頭皮表面に接着し固定する磁石と、それを震動させる着脱可能なコイル部からなっている。コイル部に音響信号を印加すると、磁界の変化により近傍にある磁石が震動する。

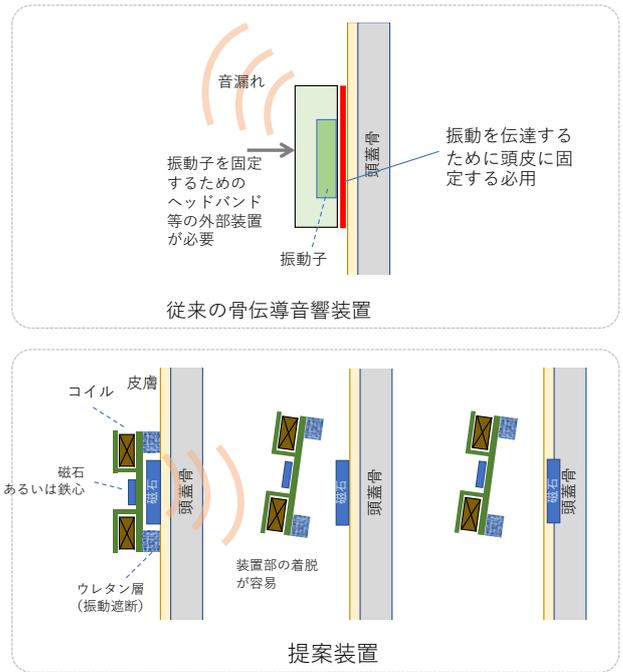


図 2 提案構成。頭部に接着する磁石部と、それを励起させるための着脱可能なコイル部より成っており、本体のみで他にバンドや耳掛けなどの治具を必要とせず頭部に装着することが可能になっている。

	イヤ フォン	肩 のせ	骨 伝導	BAHA	提案 方式
目立たなさ	—	×	×	—	✓
耳を塞がない	×	✓	✓	✓	✓
装着の負担	—	—	×	✓	✓
音漏れ	✓	×	×	×	—
手術不要	✓	✓	✓	×	✓

表 1 提案方式の特徴 (✓: good, —: fair, ×: poor)

磁石は予め頭皮に固定されているため、コイル部の多少のずれによっても振動を伝達できる。コイル部の位置変化による音情報の変化は接触方式と比較して少ない。また、コイル部の震動を抑制することで、外部への音漏れを抑えることができる。

コイル部には小型の磁石ないしは鉄心が中心に置かれ、頭皮の磁石との間の磁力によりコイル部を頭皮に吸着させる効果を持っており、ヘッドセットやクリップなどの固定機具を要せずにコイル部を頭部に装着可能である。コイル部は振動発生機構を持たないので構成が非常に簡便になっている。また、コイル部に可速度センサ、マイクなど他のセンサを付与することで音声インタフェースや頭部ジェスチャーの認識なども可能になる。従来方式と比較した提案方式の特性を表 1 に示す。

提案方式では、磁石の装着部は皮膚と頭蓋骨の間に筋肉が少なく、適切に震動を伝達できる部分であればどこでも可能であるが、常時装着のための目立たない箇所として、

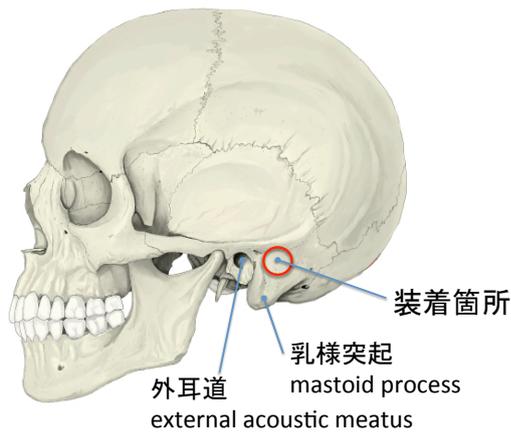


図 3 デバイス装着箇所

耳介の裏側、乳様突起 (mastoid process) 上方を選択している (図 3)。また、耳介に磁石を置き、耳介の裏側からコイルで駆動する方式でも音が感じられることを確認している。

実際に装着した状況を図 4 に示す。使用した磁石はネオジム (強度 M50) で、直径 10 mm、高さ 2 mm、重量 0.2 g のものを用いている。この磁石を、絆創膏あるいは皮膚接着剤で頭皮に固定する。固定したままで日常生活 (入浴や就寝を含む) は支障なく過ごすことができる。磁石の人体への接着は、磁気治療器具として広く利用されており、身体への安全性も確認されている。

提案方式に関連する構成として、外耳道に小型の磁石を入れ、それを外部のコイルによって励起する構成の商品が存在するが、常時装着のために外耳道を塞がないという本研究の目的は達成できていない。また、コイルと磁石の距離が離れるため、磁石の振動が微細になり、それを聞き取るために磁石を外耳道の中、鼓膜近くまで入れる必要がある。使用後の磁石の安全な取り出しが難しく、鼓膜の破損などの危険性も存在する。

試作したデバイスを図 5 に示す。コイル部はコイルボbinを三次元プリンタで整形したものに 0.2 mm のウレタン皮膜銅線 (UEW) を 110 ターン巻いたものを利用している。コイル部のサイズは直径 17 mm、高さ 5 mm、重量は 2.6 g である。コイルの抵抗値は 4.7 Ω で、これをデジタルアンプにより駆動する。コイルボbin中央には小型のネオジム磁石あるいは鉄心を埋設し、コイル部が頭皮に安定して吸着されるようになっている。装着した例を図 4(下) に示す。耳介の裏側に機器が装着でき、通常の生活でも支障がない。小型マイクと併用することで、Siri, Google アシスタントなどの音声インタフェースが利用が可能である。

3. 聴覚検査

試作した装置を複数人の利用者に装着してもらい、音声や音楽等を流し、十分に聞き取り可能であることを確認し

た。さらに、装置の性能を定量的に評価するために聴覚検査実験を行った。

実験参加者は、利き耳側の耳介背後に提案デバイスを装着し、両耳を耳栓で塞いだ状態 (以下 “bone” 条件) と、比較のため、カナル型イヤフォンを利き耳側のみに装着し、反対側の耳を耳栓で塞いだ状態 (以下 “phone” 条件) とで、各周波数に応じて聞こえる最小限の音量をボタン押下により記録した。検査に用いた周波数は 15 から 16,000 Hz の 13 種類で、通常の聴覚検査 [17], [20] に準拠して、まず 1000Hz の試験から順に周波数を上げて行い、次に 2000 Hz から周波数を上げて行う。実験参加者は bone 条件と phone 条件とでそれぞれ 2 回ずつ検査を実施する。実験参加者数は 6 名 (全員が男性、年齢は 24~39 歳) だった。

検査の結果を図 6 に示す。グラフは検査の結果の平均値と、平均値の標準誤差 (SE: standard error) によるエラーバーを付したものである。グラフに示されているとおり、bone 条件, phone 条件ともほぼ同様の反応があり、提案デバイスが通常の聴覚デバイスと比較して十分な音響伝達性能を持っていることが確認できた。

下のグラフは、各実験参加者の聴覚能力の差を考慮して、



図 4 装着の様子: (a) 磁石を皮膚に接着. (b) 磁石を絆創膏で固定している状態. (c) コイル部を付与した状態. (d) マイクと同時に装着している状態

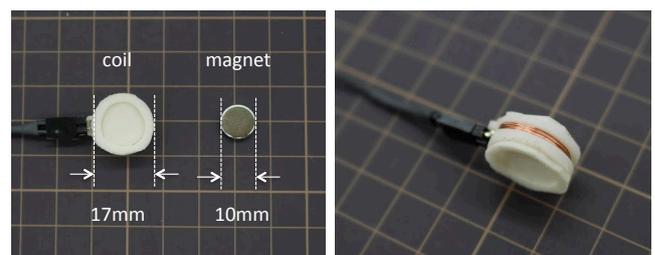


図 5 デバイス試作例

1000 Hz での反応を -50 dB となるように値全体にバイアスを与えたものである。

また、実験参加者からは「低い周波数の場合は音としてではなく皮膚の振動として感じられた」との感想を多く得た、実験結果によれば、低い周波数 (15 Hz から 44 Hz) 帯域では、phone 条件での標準誤差が増加している。また、同一人物での 2 回の反応の値が異なっている、あるいは回答が成されていない場合があることがわかった。一方、bone 条件ではこのようなことはなく、標準誤差も小さい。この結果は、phone 条件のときは低い周波数帯域を音としては認知できないまま (適当なタイミングで) ボタンを押してしまったのではないかと推測している。一方、bone 条件ではそのようなことがなく、低周波を皮膚への振動として感じ取れた強さを正しく答えている。

このことから、提案デバイスでは可聴域の音声デバイスとしての機能を有することが確認でき、さらに皮膚への振動を伝達する一種のタクトイルフィードバック装置としても機能していることがわかった。この性質により、たとえば新しいメッセージの到着を音ではなく振動で伝えるなどが可能になり、外部騒音のある環境下でも情報伝達を可能

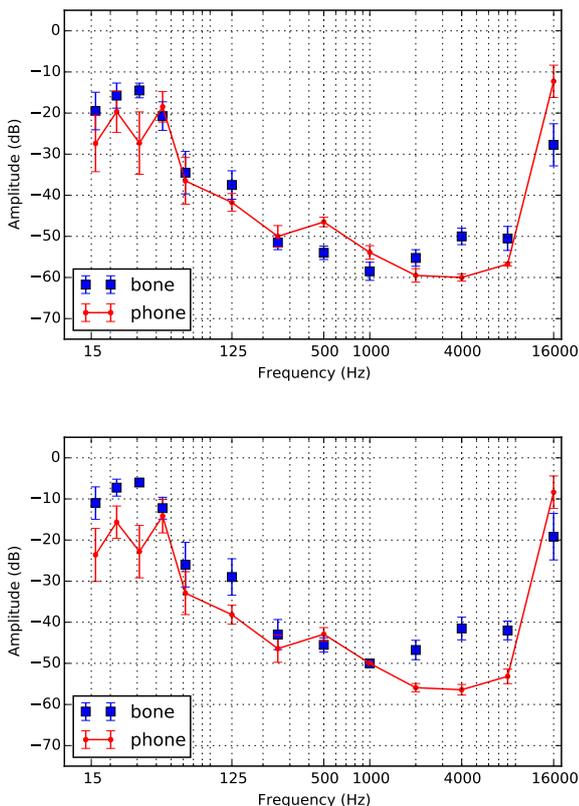


図 6 提案デバイス (bone) と通常のカナル型イヤホン (phone) による聴覚検査結果。6 名の実験参加者による平均値及び標準誤差 (SE) を示す。下のグラフは、各実験参加者の聴覚能力の差を考慮して、1000 Hz での反応を -50 dB となるように全体の値を調整したものの

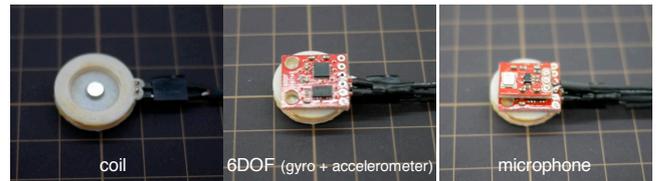


図 7 付与するセンサーの可能性: 左: コイルのみ, 中: 6 自由度 (6-DOF) ジャイロおよび加速度センサー, 右: MEMS マイクロフォン



図 8 付与センサーによる頭部動作の認識: うなずき、首振りなどの微細な頭部動作が付与したジャイロ・加速度センサーにより認識する。音声を介さない返答が可能になる。

にすることができると考えている。

4. 他のセンサーとの併用

提案デバイスに他のセンサを追加することが可能である。図 7) は、デバイス上に MEMS マイクロフォンおよび 6 自由度 (6-DOF) の加速度・ジャイロセンサを追加したものである。ジャイロセンサにより、装着者の頭部の微細な動きを取得することができる。これにより、音声ではなくうなずきなどのジェスチャーの認識も可能である。図 8) (及び補助資料のビデオ) に、YES と NO を意味するうなずきと首の横振りを認識している例を示す。頭部の 3 軸に関する角速度を 6-DOF データとして取得し、Time Warping アルゴリズム [2] によりジェスチャーの弁別を行っている。この実現には Gesture Recognition Toolkit (GRT) を利用している [5]。

5. 議論

適用領域

提案方式により、日常生活での音声インタフェース常時利用が可能になる。Siri, Google Assistant などを利用してコンピュータと常に接続し支援を受けることが可能になる。通常の携帯電話やスマートウォッチでは、利用するために機器を取り出したり、腕時計を操作する必要などがあったが、音声インタフェースにより日常の生活や作業を中断しないまま操作を行うことができ、always connected な人間が誕生する。従来から、音響拡張現実 (Audio Augmented Reality) という研究領域は存在したが、ヘッドフォンなどを前提としていたため美術館の鑑賞体験拡張などに応用が



図 9 頭皮以外への装着：(左) 歯への装着 (右) 足爪への装着 (シューズ内にコイルが装備されている)

限定されていた [1], [8], [11], [14], [18]。本研究により多くの音響拡張現実応用例が生まれることを期待している。

提案方式は音声フィードバックによるスポーツトレーニング(サイバネティックトレーニング) [7], [15], [19] など、非言語の音声情報による支援にも利用可能である。また、咀嚼音の付与により食体験が変化することが知られている [10]。しかし、イヤホンやヘッドフォンを装着して食事をすることは快適とはいえ普及には至っていない。本研究の構成により、音響による食体験の向上が現実的な応用として可能になると考えている。

複数個の使用

本装置を 2 個、頭部左右に装着することで、左右音の聞き分けが可能であり、ステレオ音声で音像の定位も感じられた。骨伝導装置でありながら、左右の内耳への距離が異なり、右側の装置はより右側の蝸牛管を刺激しているものと考えられる。この性質を利用して、オーディオアイコンのように空間に定位する音声情報を提示することの可能性がある。

頭皮以外部位への適用可能性

頭皮以外の装着場所として、歯に磁石を装着する可能性がある。歯への振動は皮膚による減衰を経ず直接頭蓋骨へ伝達することができる。歯列矯正用のマウスピースにネオジム磁石を接着したものを歯に装着し、頬にあてたコイルによる励起を試み、音声伝達可能であることを確認した(図 9 左)。この構成では生活に支障のないコイル部の装着位置が課題だと考えている。

提案の分離型構成は、他の触覚インタフェースデバイスへも応用が可能である。骨伝導装置と同様、触覚インタフェースを効果的に利用するためには、皮膚への的確な接触が重要ではあるが、これが利用性を制限していることが多い。小型の磁石を皮膚に接着することは磁気治療等で広く行われており、機器を分離することで装着性を保って触覚インタフェースを構成することができる。たとえば図 9 (右) は足爪に磁石を接着した例で、シューズに装備されたコイルからの励起で振動を足に与えることができる。この構成により、振動モーターなどの機構部がなくても触覚イ

ンタフェースつきのスマートシューズが構成可能になる。

6. 関連研究

皮膚に振動子を配するという点では、本研究は多くの触覚インタフェースと関連する。実際、本研究のデバイスを触覚インタフェースのデバイスとして利用することも可能である。一方、本研究のデバイスは音声情報を伝達できるので、通常の震動インタフェースとは表現能力が大きく異なる。NailTactors は、爪表面に複数の震動子を配し、震動の順序によって記号を伝達しようとするものである [9]。10 種類の記号を毎秒 1 回の頻度で情報伝達できるとしている。Facebook は “Hear with skin” と称して皮膚への震動インタフェースによって記号を伝達する実験を行っている。詳細は明らかにされていないが公開されているビデオによれば、数秒につき 9 種類の記号から一つを選択するタスクを実現しているレベルで、情報インタフェースとして供するにはまだ課題を残している。これらと比較して、音声による情報伝達は遥かに効率的であり認識精度も高い。

福本らは手から耳に振動を伝達する手持ちの装置 “Whisper” を提案した [3]。携帯電話のような大きさのデバイスを持っていなくても音声通話が可能にする。実際には手に振動子を装着しているので、会話の際には指を耳に接触させる必用があり、会話中に他の動作を行うことが困難であった。提案デバイスは、会話中も両手で他の動作を行うことが可能になる。

身体に装着した振動子により方向などの空間情報を提示する手段としては、腰に巻いたベルトに振動子を配する ActiveBelt [16] や、ベスト型の振動子アレイを装着する VEST (Versatile Extra-Sensory Transducer) [13] などがある。本デバイスでも複数個を体表に配することで、空間提示の可能性があると考えている。

本稿では主に音声出力デバイスについて検討したが、音声入力との併用は当然重要な課題である。現段階では通常の小型マイクを用いているが、骨伝導あるいは肉伝導マイクロフォン等による非可聴つぶやき (Non-Audible Murmur, NAM) [12] との併用は興味深い発展の方向である。これにより、常時装着しながら衆人環境であっても音声インタラクションを行うことができるようになる。

7. 結論

本論文では、人とコンピューティングリソースに継続的に接続して人の能力を拡大する有効な手段としての常時利用可能な聴覚インタフェース装置の構成を提案した。頭皮に取り付けられた小さな磁石と別個のコイルとからなる提案の装置は、骨伝導型の音響原理に基づくものの、従来必用だった頭部固定用のヘッドバンド等の必要性をなくし、常時装着に必用な目立たなさと通常の外耳道を経由する聴覚を阻害しない特徴を有している。

この構成により、提案された装置は、通常の聴力に加えて、ユーザのコンピュータ接続可能な聴覚を提供する。ユーザーの調査によると、このデバイスはカナル型イヤホンと同じ性能を示し、低周波領域の知覚は皮膚の振動によって伝えられることを検証した。また他のジャイロセンサ等を付与することを可能にし、うなずきなどの微細な頭部動作の同時認識を可能にした。

参考文献

- [1] Benjamin B. Bederson. 1995. Audio Augmented Reality: A prototype automated tour guide. In *CHI'95 Conference Companion*. 210–211.
- [2] Donald J. Berndt and James Clifford. 1994. Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (AAAIWS'94)*.
- [3] Masaaki Fukumoto and Yoshinobu Tonomura. 1999. Whisper: A Wristwatch Style Wearable Handset. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*. ACM, New York, NY, USA, 112–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/302979.303009>
- [4] Hugo Gernsback. 1924. Acoustic Apparatus. *US PATENT* 1521287 (1924).
- [5] Nicholas Gillian and Joseph A. Paradiso. 2014. The Gesture Recognition Toolkit. *J. Mach. Learn. Res.* 15, 1 (Jan. 2014), 3483–3487. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2627435.2697076>
- [6] B. Hakansson, A. Tjellstrom A, U. Rosenhall U, and P. Carlsson P. 1985. The bone-anchored hearing aid. Principal design and a psychoacoustical evaluation. *Acta Otolaryngol* 100, (3-4) (1985), 229–239.
- [7] Shoichi Hasegawa, Seiichiro Ishijima, Fumihiko Kato, Hironori Mitake, and Makoto Sato. 2012. Real-time Sonification of the Center of Gravity for Skiing. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference (AH '12)*. ACM, New York, NY, USA, Article 11, 4 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2160125.2160136>
- [8] Florian Heller, Aaron Krämer, and Jan Borchers. 2014. Simplifying Orientation Measurement for Mobile Audio Augmented Reality Applications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 615–624. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2556288.2557021>
- [9] Meng-Ju Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. 2016. NailFactors: Eyes-free Spatial Output Using a Nail-mounted Tactor Array. In *Proc. of MobileHCI '16*. ACM, 29–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2935334.2935358>
- [10] Naoya Koizumi, Hidekazu Tanaka, Yuji Uema, and Masahiko Inami. 2011. Chewing Jockey: Augmented Food Texture by Using Sound Based on the Cross-modal Effect. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '11)*. ACM, 21:1–21:4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2071423.2071449>
- [11] Elizabeth D. Mynatt, Maribeth Back, Roy Want, and Ron Frederick. 1997. Audio Aura: Light-weight Audio Augmented Reality. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '97)*. ACM, New York, NY, USA, 211–212. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/263407.264218>
- [12] Yoshitaka Nakajima, Hideki Kashioka, Nick Campbell, and Kiyohiro Shikano. 2004. Non-Audible Murrur Recognition. *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers* 87, 9 (sep 2004), 1757–1764. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003171166/en/>
- [13] Scott D. Novich and David M. Eagleman. 2015. Using space and time to encode vibrotactile information: toward an estimate of the skin's achievable throughput. *Experimental Brain Research* 233, 10 (2015), 2777–2788. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00221-015-4346-1>
- [14] Spencer Russell, Gershon Dublon, and Joseph A. Paradiso. 2016. HearThere: Networked Sensory Prosthetics Through Auditory Augmented Reality. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016 (AH '16)*. ACM, New York, NY, USA, Article 19, 8 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2875194.2875247>
- [15] J.H. Sandweiss and S.L. Wolf. 1985. *Biofeedback and Sports Science*. Springer US.
- [16] Koji Tsukada and Michiaki Yasumura. 2004. Active-belt: Belt-type wearable tactile display for directional navigation. In *Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag GmbH, Oct 2004*. Springer, 384–399.
- [17] Maureen Valente. 2009. *Pure-Tone Audiometry and Masking (Core Clinical Concepts in Audiology)*. Plural Publishing, Inc.
- [18] Yolanda Vazquez-Alvarez, Matthew P. Aylett, Stephen A. Brewster, Rocio Von Jungendorf, and Antti Virolainen. 2015. Designing Interactions with Multilevel Auditory Displays in Mobile Audio-Augmented Reality. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 23, 1, Article 3 (Dec. 2015), 30 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2829944>
- [19] 太田 憲, 梅垣 浩二, and 室伏 広治. 2009. 小型センサを用いたハンマー投のトレーニング-サイバネティック・トレーニングを目指して-. *スポーツ工学 (JSEA 機関誌, 特集北京オリンピック)* 4 (2009), 7–12.
- [20] 日本聴覚医学会. 2017. 聴覚検査の実際 改訂 4 版. 南山堂.